

Optimierung der städtischen Energieversorgung am Beispiel der Stadt Augsburg unter besonderer Berücksichtigung von Wärmetransportmechanismen

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

Vorgelegt an der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Universität Augsburg

von
Joachim Herrmann

Diedorf 14.04.2012

Erstgutachter: Professor Dr. Armin Reller
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Augsburg,
Lehrstuhl für Ressourcenstrategie

Zweitgutachter: Professor Dr. Thomas Hamacher
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität
München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

eingereicht am: 25.04.2012

Tag der mündlichen Prüfung (Disputation): 09.01.2013

Danksagung

Ich möchte mich ganz herzlich für eure Unterstützung bedanken. Insbesondere und stellvertretend für alle anderen bei Elena, Thomas, Claudia, Gerda & Gerd, Jens, Tobias und Heiner.

Für Annemarie Herrmann

Diedorf, 17.02.2013, Joachim Herrmann

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| I. Wärmeatlas | 13 |
| 1. Physik der Gebäude | 17 |
| 1.1. Transmission und Lüftung | 17 |
| 1.1.1. Lüftung | 17 |
| 1.1.2. Transmission | 18 |
| 1.2. Solare und Interne Gewinne | 19 |
| 1.3. Passive Speicherung | 20 |
| 1.4. Norm Heizlast | 21 |
| 1.5. Der Raumwärmebedarf | 22 |
| 1.5.1. Stündliche Auflösung | 22 |
| 1.5.2. Jahresauflösung | 23 |
| 2. Gebäudedatenbank | 25 |
| 2.1. Anforderungen an die Gebäudedatenbank | 25 |
| 2.2. IWU-Gebäudetypisierung | 26 |
| 2.3. Augsburger Gebäude | 27 |
| 2.4. Zuweisung der IWU-Gebäudetypisierung | 30 |
| 2.5. Vollständigkeit der Daten | 31 |
| 2.6. Geschossfläche | 33 |
| 2.7. Gebäudehülle | 36 |
| 2.8. Ist-Wärmenachfrage | 36 |
| 2.9. Jahresverlauf der Wärmenachfrage | 42 |
| 3. Abschätzung des Wärmebedarfs mit der Jahresmethode | 47 |
| 3.1. Stadtklima | 47 |
| 3.2. Wärmebedarf | 49 |
| 3.3. Abgleich mit Endenergiebezugsdaten | 51 |
| 3.4. Räumliche Verteilung der Wärmenachfrage | 56 |
| 4. Abschätzung des Wärmebedarfs auf Stundenbasis | 61 |
| 5. Abschätzung der Entwicklung des Wärmebedarfs mit der Jahresmethode | 65 |
| 6. Resümee | 71 |
| II. Optimierung von Referenzenergiesystemen | 73 |

| | |
|---|----------------|
| 7. der Modellgenerator <i>newURBS</i> | 75 |
| 8. Modelle | 79 |
| 8.1. Basis-Modell | 79 |
| 8.2. Referenz Szenario 2010 | 83 |
| 8.3. Szenarien 2020 | 84 |
| 8.3.1. 2020, San=1%, CO ₂ Strom = 580 g/kWh | 85 |
| 8.3.2. 2020, San=1%, CO ₂ Strom = 464 g/kWh | 89 |
| 8.3.3. 2020, San=2% | 91 |
| 8.3.4. 2020, Zusammenfassung | 92 |
| 8.4. Szenarien 2030 | 93 |
| 8.4.1. 2030, San=1%, CO ₂ Strom = 580 g/kWh | 93 |
| 8.4.2. 2030, San=1%, CO ₂ Strom = 348 g/kWh | 95 |
| 8.4.3. 2030, San=1%, CO ₂ Strom = 580 g/kWh PV | 96 |
| 8.5. Szenarien 2050 | 97 |
| 8.5.1. 2050, San=1%, CO ₂ Strom = 580 g/kWh | 98 |
| 8.5.2. 2050, San=1%, CO ₂ Strom = 116 g/kWh | 101 |
| 8.5.3. 2050, San=3%, CO ₂ Strom = 580 g/kWh | 102 |
| 8.5.4. Zusammenfassung 2050 | 103 |
| III. Boden-Wärmeflussmodell | 105 |
| 9. Grundlagen | 109 |
| 9.1. Die Wärmeleitungsgleichung | 110 |
| 9.1.1. Wärmeleitung | 110 |
| 9.1.2. Wärmekapazität | 111 |
| 9.1.3. externe Energiequellen & -senken | 111 |
| 9.1.4. Wärmeleitungsgleichung | 112 |
| 9.2. Lösung der Wärmeleitungsgleichung | 112 |
| 9.2.1. stationäre Lösung: | 113 |
| 9.2.2. Lösung mit t und x als Produkt | 114 |
| 9.2.3. periodische Rahmenbedingungen | 115 |
| 9.2.4. Temperaturpuls | 121 |
| 9.3. Diskretisierung | 121 |
| 9.3.1. Stabilität der Lösung | 123 |
| 10. Modellierung | 127 |
| 10.1. Module | 127 |
| 10.1.1. Modul Wärme \longleftrightarrow Temperatur | 127 |
| 10.1.2. Modul Fourier'sches Gesetz | 128 |
| 10.1.3. Oberflächen Modul | 129 |
| 10.1.4. Erdwärme Modul | 130 |
| 10.1.5. Grundwasser Modul | 130 |
| 10.1.6. Kollektor/Wärmepumpen Modul | 131 |
| 10.1.7. Kollektor-Rückspeisung Modul | 132 |
| 10.1.8. Laufsequenz | 132 |

| | |
|--|------------|
| 10.2. Überprüfung des Modells | 134 |
| 10.2.1. Wärmepuls | 134 |
| 10.2.2. periodische Anregung | 137 |
| 10.3. Anfangs- und Rahmenbedingungen | 139 |
| 11. Szenarien | 143 |
| 11.1. horizontaler Flächenkollektor | 146 |
| 11.1.1. EFH i Koll | 146 |
| 11.1.2. EFH i Koll Sol bzw. EFH i Koll Kühl | 156 |
| 11.1.3. Zusammenfassung | 159 |
| 11.2. vertikale Sonde | 164 |
| 11.2.1. EFH i: | 164 |
| 11.2.2. Niedrig-Energie-Haus mit Solarkollektor: | 169 |
| 11.2.3. Passiv-Haus <i>EFH P</i> mit Kühlung | 173 |
| 11.2.4. Zusammenfassung Sonde | 173 |
| 11.3. Kollektor unter Keller | 175 |
| IV. Diskussion | 181 |
| 12. Anhang | 195 |
| 12.1. zu Wärmeetlas | 195 |
| 12.1.1. zu Transmission | 195 |
| 12.1.2. DGL Speicherwirkung von Gebäuden | 198 |
| 12.1.3. Wärmeleitungsgleichung | 200 |
| 12.1.4. Deutsche Gebäudetypologie | 201 |
| 12.1.5. Datenqualität | 202 |
| 12.1.6. Grundflächenzahl | 203 |
| 12.1.7. Sanierungsraten | 203 |
| 12.1.8. Wärmekarten | 203 |
| 12.2. zu Optimierung von Energiesystemen | 208 |
| 12.2.1. Abschätzung Biomasse in Augsburg | 208 |
| 12.2.2. Abschätzung Solarpotential in Augsburg | 208 |
| 12.2.3. Primärenergiefaktor | 208 |
| 12.3. zu Boden-Wärmeflussmodell | 209 |
| 12.3.1. zu Wärmeleitungsgleichung - periodische Rahmenbedingungen | 209 |
| 12.3.2. zu Wärmeleitungsgleichung - Eindringtiefe halbinendlicher Körper | 209 |
| 12.3.3. zu Wärmeleitungsgleichung - Herleitung Admittanz | 210 |
| 12.3.4. Szenarien Bodenmodell | 211 |
| 12.3.5. Abschätzung maximaler Wärmeentzug mittels Sonde | 211 |

Motivation

Rund um den Globus wird von uns Menschen technisch bereitgestellte Energie in unterschiedlichster Form und in immer größeren Mengen genutzt. 2008 wurden nach [BP (2009)] 11294,9 Millionen Tonnen Öl-äquivalent, das entspricht 473 EJ an Primärenergie nutzbar gemacht. Ca. 3,3%¹ davon wird in Deutschland verwendet. „Verbraucht“ wird die Energie für Beleuchtung, Wärme und Kälte, mechanische Energie, Informationsdienstleistungen und Transport.

Aufgrund der Begrenztheit der wichtigsten heutigen Primärenergieträger, allen voran Öl, Gas und Uran (vgl. [BMW (2009a)]²) steht die Energieversorgung in diesem Jahrhundert unausweichlich vor tiefgreifenden Veränderungen. Viel früher sollte uns der Klimawandel zu einer Dekarbonisierung und somit zu einem Umbau der Energiesysteme zwingen (vgl. [IPCC (2008)]).

Als Resultat auf diese sich wandelnden Rahmenbedingungen ist es nötig, die Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Bestandteilen unserer Energiesysteme bestmöglich zu verstehen, um Fehlentwicklungen auf unserem Weg in die Energieversorgung der Zukunft vermeiden zu können. Im Besonderen vor dem Hintergrund der Lauf- bzw. Lebenszeiten von Kraftwerken und Verteilsystemen, von der Planung bis zur Stilllegung von einigen Jahrzehnten (vgl. [DENA (2008)]³) legen heutige Entscheidungen die Gestalt der Energieversorgung für eine lange Zeitperiode fest. Falsche Entscheidungen können einen Umbau in eine nachhaltigere Versorgung um Jahrzehnte verzögern.

Die Deutsche Bundesregierung setzte mit dem Beschluss vom 23. August 2007 über die „Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm“ [IEKP (2007)] Rahmenbedingungen, um in Deutschland bis 2020 bis zu 37% [UBA (2007)] an CO₂-Emissionen gegenüber dem Jahr 1990 einzusparen. Dabei wurden 29 Punkte definiert. Diese beinhalten unter anderem:

- Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
- Energieeinsparverordnung
- CO₂-Gebäudesanierungsprogramm
- Erneuerbare-Energien Wärmegesetz (EEWärmeG)
- Programm zur energetischen Sanierung von Bundesgebäuden

Die Deutsche Bundesregierung hat mit dem KWK-Gesetz [KWK (2002)] das Ziel gesetzt, den Anteil des durch Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten Stroms auf 25% zu erhöhen. Laut Umweltbundesamt [UBA (2007)] können dadurch die CO₂ Emissionen bis zum Jahr 2020 um jährlich 14,3 Mio. t reduziert werden. Nach [DENA (2008)]⁴ muss dazu 2020 eine Strommenge von über 140 TWh KWK-Strom generiert werden. Bei einem typischen elektrischem Wirkungsgrad von KWK-Anlagen⁵

¹ 14003 PJ nach BMWi (2009b) Tabelle 4 Jahr 2008

² Seite 9 Schaubild 2

³ Seite 3

⁴ Seite 33

⁵ Stromkennzahl 1

wird dabei eine Wärmemenge von ca. 500 PJ erzeugt. Derzeit⁶ beträgt nach [BMWi (2009a)]⁷ der Verbrauch von Fernwärme in Deutschland 264 PJ⁸.

Daneben soll durch das Erneuerbare Energien Wärme Gesetz [EEWG (2008)] verstärkt Energie aus erneuerbaren Energieträgern zur Wärmeerzeugung beitragen⁹.

Gleichzeitig werden in Deutschland sowohl Gesetzgebung, z.B. durch die Energieeinsparverordnung [EnEV (2007)] als auch Fördermaßnahmen (Zusammenfassung in [Bay (2009)]) eingesetzt, um den Raumwärmebedarf von Gebäuden zu reduzieren. Aufgrund des Klimawandels werden in Bayern nach [Grad (2008)]¹⁰ „im Sommer ... die mittleren Temperaturen und die Minimumtemperaturen bis zum Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zu 1971 bis 2000 um ungefähr 1,4 Grad steigen, die Maximaltemperaturen mit 2 Grad noch etwas mehr. Im Winter liegt die Zunahme mit durchschnittlich 2,1 Grad noch darüber.“ Dies führt zu einem weiteren Rückgang der Raumwärmenachfrage.

Unter Berücksichtigung höherer Temperaturen und besserer Wärmestandards der Gebäude ist in Zukunft im Allgemeinen von einer Reduzierung der Wärmenachfrage auszugehen. Dieser Trend ist seit einiger Zeit auch in den heute bereits bestehenden Fernwärmegebieten zu erkennen. Darüber hinaus muss davon ausgegangen werden, dass Stadtgebiete mit besonders hoher Wärmenachfragedichte, die sich besonders für die Versorgung mit Fernwärme eignen, bereits erschlossen sind. Einem weiteren Zubau an Fernwärmegebieten sind somit ökonomisch Grenzen gesetzt. Zur Steigerung des KWK-Stromes können neben Anlagen in Kraftwerksgröße auch dezentrale Blockheizkraftwerke genutzt werden. Um mit diesen einen deutlich spürbaren Beitrag zur Erzeugung von KWK-Strom leisten zu können, müssten hunderttausende dieser Anlagen installiert werden¹¹.

Es zeigt sich, dass sich die aufgelegten Umsetzungsstrategien in den beschriebenen Bereichen zum Teil gegenseitig beeinflussen und teilweise erschweren. So soll das Wärmeaufkommen aus KWK-Prozessen zwar deutlich erhöht werden, allerdings reduzieren Gebäudeprogramme jedoch die potentiell mit KWK-Wärme zu versorgende Wärmenachfrage. Des Weiteren ist das Einsparpotential für CO₂ Emissionen der Kraft-Wärme-Kopplung stark davon abhängig, welche Primärenergieträger durch sie ersetzt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Auswirkungen der zu erwartenden Veränderungen der Wärmenachfragen in einer Stadt auf mögliche städtische Vermeidungsstrategien für Kohlendioxid untersucht. Dabei beschränkt sich die Arbeit auf eine Optimierung der Erzeugungs- und Verteilstrukturen für Wärme und Strom. Unterschiedliche Gebäudesanierungstechniken und daraus resultierende Gebäudesanierungsprogramme werden nicht explizit untersucht. Die Gebäudephysik als Grundlage für die Wärmenachfrage geht parametrisch in die Optimierungsmodelle ein. Weitere Hauptaugenmerke dieser Arbeit gelten neben dem transmissiven Wärmetransport durch Gebäudehüllen der erzwungenen Konvektion in Fernwärmenetzen, als auch den Wärmeleitmechanismen im Erdboden.

Im Teil I "Wärmeatlas" dieser Arbeit werden die Auswirkungen der Klimaänderung und der Verbesserung der Gebäudestandards im Zeithorizont bis zum Jahr 2050 auf die räumliche Verteilung der

⁶2007

⁷Tabelle 25

⁸1990: 383 PJ

⁹Das EEWG berücksichtigt KWK-Wärme und Fernwärme als Ersatzmaßnahmen für die Nutzung erneuerbarer Energien

¹⁰Seite 17

¹¹Um die Hälfte der nötigen 140 TWh KWK-Strom dezentral zu erzeugen müssten bei Anlagen einer Größenordnung von 50 kW_{el} und 5000 Vollbenutzungsstunden ca. 280 Tausend BHKW's installiert werden. Bei kleineren Anlagen entsprechend mehr.

Wärmenachfrage eines Stadtgebiets betrachtet. Dies geschieht beispielhaft für die Stadt Augsburg. Für die Berechnung des Wärmebedarfs und deren Fortschreibung wurde im Rahmen einer angegliederten Diplomarbeit [Linder (2010)] eine Gebäudedatenbank für Augsburg angelegt. Mit Hilfe eines vereinfachten Hüllflächenverfahrens kann daraus der Wärmebedarf für alle Gebäude bestimmt und die Auswirkungen sich verändernder Rahmenbedingungen untersucht werden. Die Grundlage für die Änderung der Wärmenachfragen bilden mittlere Sanierungsraten für Gebäude.

Im Teil II werden die Auswirkungen unterschiedlicher möglicher Entwicklungen im Energiesystem auf die Energieversorgung von Städten untersucht - ebenfalls am Beispiel der Stadt Augsburg. Grundlage für die Untersuchungen bildet das Optimierungstool „*newURBS*“ welches im Vergleich zu vorangegangenen Arbeiten der Arbeitsgruppe¹² deutlich erweitert wurde. Ziel ist es, (kosten-) optimale Zustände¹³ des städtischen Energiesystems in Abhängigkeit unterschiedlicher Rahmenbedingungen zu identifizieren. Dazu werden insbesondere drei Freiheitsgrade variiert: die jährliche Rate der energetischen Sanierung von Gebäuden in der Stadt, die spezifischen CO₂ Emissionen des in die Modellregion importierten Strommixes und die Reduktionsziele für die Emission an CO₂ der Stadt.

Der Teil III „Bodenmodell“ betrachtet explizit die Versorgungstechnologie der Wärmepumpe, die ebenfalls einen Beitrag zur Reduzierung des Primärenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen bei der Beheizung von Gebäuden leisten. Geht man jedoch davon aus, dass die nachhaltige Nutzung von Bodenwärme ebenso wie die für den Wärmeentzug nutzbare Bodenfläche innerhalb einer Stadt beschränkt ist, können Wärmepumpen nur zum Teil zur Wärmebereitstellung eingesetzt werden. Unter der Annahme sinkender Wärmenachfragen der Gebäude stellt allerdings die Wärmepumpe für immer größere Bereiche einer Stadt dennoch ein potentielles Heizsystem dar. Zur Untersuchung der thermischen Leistungsfähigkeit des Bodens wurde ein finite-Differenzen-Wärmeflussmodell implementiert. Dieses zeigt insbesondere auf, in wie weit der Entzug von Wärme aus dem Boden regenerativ ist und welche Auswirkungen er auf die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe hat. Im weiteren soll die maximal mögliche Wärmemenge pro Grundfläche abgeschätzt werden, die regenerativ entzogen werden kann. Darüber hinaus werden in diesem Kapitel Möglichkeiten der saisonalen Speicherung von Wärme im Boden simuliert.

¹²z.B. [Richter (2004)]

¹³Verteilung der Kapazitäten der Erzeugungs- und Verteilsysteme und deren Fahrweise.

Teil I.

Wärmeatlas

Schwerpunkt dieser Arbeit ist es, anhand eines Wärmeatlas die Konsequenzen der sich wandelnden Rahmenbedingungen zu bestimmen und Handlungsalternativen zu untersuchen bzw. zu finden, die mit ambitionierten Klimaschutzzielen konform gehen.

Im Folgenden wird ein Wärmeatlas beispielhaft für die Stadt Augsburg erstellt. Dieser Wärmeatlas soll dabei neben der räumlichen Verteilung der Wärmenachfrage auch den zeitlichen Verlauf bis zum Jahr 2050 beschreiben. Im Anschluss können anhand dieser Ergebnisse eine Vielzahl von Fragestellungen diskutiert werden.

Der Treiber für die Wärmenachfrage ist unser Bedürfnis nach angenehmem Wohnklima. Wetter und Gebäudephysik setzen die Rahmenbedingungen, die den Verlauf dieser Nachfrage hauptsächlich bestimmen. Neben dem sich daraus ergebendem Raumwärmebedarf tragen sowohl der Prozesswärmebedarf als auch der Bedarf an Wärme für die Warmwasserbereitung zur Wärmenachfrage bei. Für die Bereitstellung von Raumwärme und warmem Wasser wurden 2007 in Deutschland nach [BMWi (2009b)]¹⁴ über 31% des gesamten Endenergiebedarfs verwendet. Größtenteils wurden dafür die Endenergieträger Gas, Öl und Fernwärme genutzt. Der Wärmeatlas, wie er für diese Arbeit entwickelt wurde, konzentriert sich auf diesen Teil der Endenergienachfrage. Weitere 23% an Endenergie werden für die Bereitstellung von Prozesswärme eingesetzt.

Durch zu erwartende energetische Sanierungen im Gebäudebestand, ebenso wie durch eine zu erwartende Klimaerwärmung - nach [Grad (2008)] in Bayern 2,1°C bis 2050 - wird sich die Raumwärmenachfrage in den nächsten Dekaden deutlich verringern. Dies hat eine Reduktion der Wärmebedarfsdichte zur Folge und somit Auswirkungen auf Versorgungssysteme mit direktem Flächenbezug. Solche Systeme sind unter anderem: Solarthermie (Flächenbedarf für Kollektoren), Wärmepumpen (Beschränktheit des nachhaltigen Entzugs von Umweltwärme¹⁵), Gas- und in noch viel stärkerem Maße Fernwärmenetze (hohe Verlegungskosten für Rohrleitungssysteme).

Für Energieversorger ergibt sich somit die Aufgabe auf ein Umfeld zu reagieren, in dem sich sowohl die Nachfrage und somit die Verteilstrukturen ändern (müssen) als auch ein Anreiz/Zwang zur Dekarbonisierung der Endenergiebereitstellung vorliegt. Die Deutsche Bundesregierung hat mit den Merseburger Beschlüssen die Eckpunkte eines integrierten Energie- und Klimaprogramms IEKP (2007) beschlossen. Ein im [IEKP (2007)] beschriebener Weg ist der deutliche Ausbau der Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Um die für diesen Ausbau nötigen Investitionsentscheidungen treffen zu können, sind hierbei sowohl für die Strom- als auch für die Wärmenachfrage detaillierte Kenntnisse über Größe und Verlauf der Nachfragen notwendig. Dementsprechend bildet die Gebäudephysik mit ihrem Einfluss auf den Raumwärmebedarf und die Verteilung der Gebäudetypen im Stadtgebiet die Grundlage für die Einsetzbarkeit der Fernwärme und begrenzt dadurch den Anteil von (zentraler) KWK-Wärme und somit auch von KWK-Strom.

Grundstein für die Schaffung des Wärmeatlas ist eine Gebäudedatenbank. Diese wurde für Augsburg im Rahmen einer angegliederten Diplomarbeit [Linder (2010)] erstellt. Bestandteil der zusammengetragenen Gebäudedatensätze sind unter anderem Gebäudehöhe¹⁶, Grundfläche der Gebäude¹⁷, Geschossflächen und Gebäudealter¹⁸. Es gibt keine Information über den Gebäudeaufbau, sprich Wandaufbau, Fensterqualität, Dachaufbau etc.. Um dennoch auf die Gebäudephysik der Augsburger Ge-

¹⁴Tabelle 7

¹⁵aus dem Boden

¹⁶vorwiegend aus Laserscanningdaten aus Befliegungen.

¹⁷vorwiegend aus Kartenmaterial der Stadt Augsburg.

¹⁸abgeschätzt aus erster verfügbarer Datierung des Wasseranschlusses des Gebäudes.

bäude schließen zu können wird in Anlehnung an die Gebäudetypisierung nach [IWU (2003)]¹⁹ im Folgenden jedem Gebäude eine typische thermische Hülle zugeordnet. Dadurch ist es möglich, aus Wetter- und Gebäudedaten über ein Hüllflächenverfahren die Wärmebedarfslast und somit auch den Jahreswärmebedarf aller Gebäude zu berechnen.

¹⁹Siehe Anhang Abschnitt 12.1.4

1. Physik der Gebäude

Um sich in einem Gebäude behaglich zu fühlen sollten bestimmte klimatische Bedingungen im Inneren herrschen. Z.B. Innentemperaturen von 19 - 23°C etc.. Um dieses Klima bereitstellen zu können benötigt man Energie. Es gibt eine Reihe physikalischer Gesetzmäßigkeiten, die den Energieaustausch von Gebäuden mit ihrer Umgebung bestimmen. Diese sollen im Folgenden kurz beleuchtet und parametrisiert werden.

1.1. Transmission und Lüftung

Aufgabe der thermischen Hülle eines Gebäudes ist es, das äußere und das innere Klima soweit voneinander zu trennen, dass es möglich ist, die klimatischen Bedingungen im Gebäude mit erträglichem Aufwand regeln bzw. steuern zu können.

1.1.1. Lüftung

Unabdingbar für die Entkopplung von Gebäudeklima und Umgebungstemperatur ist die Abtrennung der beiden Luftmassen voneinander¹. Durch den Austausch von Raumluft mit Umgebungsluft wird der Wärmestrom

$$\Phi_L(t) = H_L(t) \Delta T(t) \quad (1.1)$$

mit

$$H_L(t) = V_{\text{Geb}} \rho_L c_L n_{\text{LW}}(t) \quad (1.2)$$

und

| | |
|------------------|--|
| H_L | spezifische Lüftungswärmeverluste des Gebäudes [W/K], |
| Φ_L | Wärmestrom durch den Luftaustausch [W], |
| V_{Geb} | Luftvolumen innerhalb des Gebäudes [m ³], |
| ρ_L | Dichte der Luft [kg/m ³], |
| c_L | spezifische Wärmekapazität der Luft [Wh/(kg K)], |
| n_{LW} | Wechselrate der Luft [h ⁻¹], |
| ΔT | Temperaturunterschied zwischen Umgebungs- und Raumluft [K] |

transportiert. Dabei ist die Luftwechselrate n_{LW} von mehreren Parametern abhängig. Von der baulichen Dichtigkeit der thermischen Hülle², vom Lüftungsverhalten der Bewohner³ und gegebenenfalls

¹ Unter Berücksichtigung der Erhaltung der Luftqualität im Gebäude durch ein Mindestmaß an Luftwechselraten.

² Fugenlüftung

³ gekippte bzw. geöffnete Fenster

von einer aktiven Lüftungsanlage⁴. Typische Luftwechselraten liegen in einer Größenordnung von 0,5 bis 0,6 1/h (vergleiche [Loga (2001)]). Für die folgenden Berechnungen wird von einer zeitlich konstanten Luftwechselrate n_{LW} während der gesamten Heizperiode ausgegangen.

1.1.2. Transmission

Mit „Transmission“ werden im Folgenden alle Effekte zusammengefasst, welche den Durchgang von Wärme durch eine Wand beschreiben. Die Transmission ist durch die Wärmeleitfähigkeit und -kapazität der Wand wie auch durch die Wechselwirkungen an den Übergängen zwischen den Oberflächen der Wand und der umgebenden Luft bestimmt. Die Oberflächeneffekte setzen sich zusammen aus Absorption und Emission von Wärme in Form elektromagnetischer Strahlung und direkter Wärmeübertragung zwischen Festkörper und Fluid aufgrund von Stößen. Für Zweiteren ist der Abtransport der Wärme im Fluid von entscheidender Bedeutung. Der Transport der Wärme im Fluid wird dabei vornehmlich durch die freie und externe Konvektion bestimmt. Die Oberflächeneffekte sind von einer großen Anzahl von Rahmenbedingungen abhängig, die im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit für jedes Gebäude berechnet werden können. Dementsprechend werden in Anlehnung an die allgemein gängige Berechnung alle Oberflächeneffekte durch einen konstanten Koeffizient α bzw. R zusammengefasst⁵. Die beiden zur Berechnung von Wärmeverlusten in Wohngebäuden anzuwendenden Werte sind nach [Wetzell (2004)]: für den Übergang Raumluf/Wand $R_{si} = 0,13 \frac{m^2K}{W}$ und für den Übergang Wand/Umgebungsluft $R_{se} = 0,04 \frac{m^2K}{W}$. Diese Werte berücksichtigen die freie und externe Konvektion und die Strahlungsbilanz der Oberflächen.

Vereinfacht kann der spezifische Transmissionswärmeverlust H_T eines Gebäudes aus

$$H_T = \frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_i} \quad (1.3)$$

mit

$$R_i = (R_{si} + \sum_j (U_{ij}^{-1}) + R_{se}) A_i^{-1} \quad (1.4)$$

und der aus der Temperaturdifferenz resultierende Wärmestrom

$$\Phi_T(t) = H_T \cdot \Delta T(t) \quad (1.5)$$

mit

| | |
|---------------|--|
| H_T | spezifischer Transmissionswärmeverlust [W/K], |
| Φ_T | Transmissionswärmestrom [W], |
| i | Index für parallel angeordnete Bauteile, |
| j | Index für seriell angeordnete Bauteile, |
| $\Delta T(t)$ | Temperaturdifferenz innen - außen [K], |
| U_{ij} | Wärmedurchgangswert des Bauteils [W/(m ² K)], |
| A_i | Fläche des Bauteils |

berechnet werden.

⁴Wird im Wohnungsbereich hauptsächlich bei Passiv-Häusern genutzt, in größeren Nichtwohngebäuden wird hingegen häufiger eine aktive Lüftung verwendet.

⁵Eine etwas tiefer gehende Beschreibung der Oberflächeneffekte ist im Anhang in Abschnitt 12.1.1 gegeben.

Die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste zwischen den Zeitschritten t_0 und t_1 eines Gebäudes ergeben sich aus

$$Q_{TL} = (H_T + H_L) \int_{t_0}^{t_1} \Delta T(t') dt' \cdot f_{\text{red}} \quad (1.6)$$

Nach [Loga (2001)] reduzieren sich Transmissions- und Lüftungswärmeverluste von Gebäuden, da im Allgemeinen einige Räume im Gebäude eine geringere Innentemperatur als die veranschlagten 20 °C aufweisen. Insbesondere sind hier z.B. Schlafzimmer, Flur, Abstellkammern und Treppenhaus anzuführen. Ebenso wird durch eine Nachtabenkung in Gebäuden der Wärmebedarf verringert. Der Faktor f_{red} , um den sich die Wärmenachfrage verringert ist nach [Loga (2001)] abhängig von der Gebäudegröße.

1.2. Solare und Interne Gewinne

Solare Warmegewinne resultieren aus dem Lichteinfall durch transparente Flächen. Die solaren Warmegewinne eines Gebäudes über ein ganzes Jahr sind stark von der Größe und der Ausrichtung der Fensterflächen in die Himmelsrichtungen abhängig. Nach dem vereinfachten Berechnungsverfahren der [EnEV (2007)] ergeben sich die solaren Gewinne durch transparente Bauteile der Ausrichtung Süd aus der spezifischen Strahlungsenergiekonstante $I_j = 270 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, der Ausrichtung Nord mit $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und mit sonstiger Ausrichtung mit $155 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Die Wärmeleistung aus solarer Einstrahlung ergibt sich aus

$$P_s(t) = \sum_j \left(\sum_i (A_{ij} \cdot g_i) \cdot P_j(t) \right) f_{\text{Fenster}}, \quad (1.7)$$

die jährlichen solaren Warmegewinne eines Gebäudes berechnen sich zu

$$Q_s = \sum_j \left(\sum_i (A_{ij} \cdot g_i) \cdot I_j \right) f_{\text{Fenster}} \quad (1.8)$$

mit

| | |
|----------------------|---|
| Q_s | solare Warmegewinne [kWh/a], |
| P_s | solare Wärmeleistung [kW], |
| I_j | spezifische Strahlungsenergiekonstante [kWh/(m ² a)], |
| P_j | solare Einstrahlung in Himmelsrichtung j [kW], |
| A_{ij} | lichte Fensterfläche des Fensters i in Ausrichtung j [m ²], |
| i | Index der Fensterfläche, |
| j | Index der Ausrichtung in die Himmelsrichtung, |
| g_i | Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung und |
| f_{Fenster} | Reduktionsfaktor (Fensterrahmen, Verschattung,...). |

Daneben sind sowohl Personen als auch elektrisch betriebene Geräte Quellen für Wärme. Nach dem Erneuerbare Energien Gesetz [EnEV (2007)] summieren sich diese internen Gewinne pro Jahr auf

22 kWh/(m² a¹). Die mittlere interne Wärmeleistung ist nach [DIN 4108] für Wohngebäude $\Phi'_i = 5 \text{ W m}^{-2}$, für Büro und Verwaltungsgebäude 6 W m^{-2} . Es gilt

$$\Phi_i = 5 \text{ W m}^{-2} \cdot A_N \quad (1.9)$$

mit

Φ_i interne Wärmegewinne [W] und
 A_N Bezugsfläche [m²].

Im Folgenden werden die internen Wärmegewinne mit

$$Q_i = 22 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{a}) \cdot A_N. \quad (1.10)$$

berechnet.

1.3. Passive Speicherung

Der zeitliche Verlauf der Innentemperatur $T(t)$ in einem Gebäude ist neben der durch ein Heizsystem zugeführten Wärmeleistung und der aufgrund der thermischen Verluste abgeführten Wärmeleistung auch von der Wärmekapazität C des Gebäudes abhängig. Die Wärmekapazität setzt sich dabei aus der Wärmekapazität des Luftvolumens und der Wärmekapazität der Baumaterialien innerhalb der thermischen Hülle nach

$$C = \sum_i m_i c_i \quad (1.11)$$

mit

m_i Masse der Materialkomponente i [kg] und
 c_i spezifische Wärmekapazität der Materialkomponente i [kJ/(kg K)]

zusammen.

Im einfachsten Fall kann ein Model für den Verlauf der Innentemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur, der Heizleistung und der spezifischen Wärmeverluste über eine Differentialgleichung aufgestellt werden⁶.

Die Lösung der Differentialgleichung ergibt sich zu

$$T(t) = T_U + \frac{P_H}{H_{TL}} + \left(T_0 - T_U - \frac{P_H}{H_{TL}} \right) e^{\left(-\frac{H_{TL}}{C} t \right)} \quad (1.12)$$

mit

$T(t)$ Temperatur im Gebäude [K],
 T_U Umgebungstemperatur [K],
 T_0 Anfangstemperatur im Gebäude [K],
 P_H Leistung des Heizsystems [kW],
 H_{TL} spezifische Transmissions- und Lüftungswärmeverluste [kW/K],
 C gesamte Wärmekapazität des Gebäudes [kWh/K] und
 t Zeit [h].

⁶Herleitung siehe 12.1.2

Abbildung 1.1 zeigt den Temperaturverlauf nach Gleichung (1.12) im inneren des Gebäudes⁷ un-

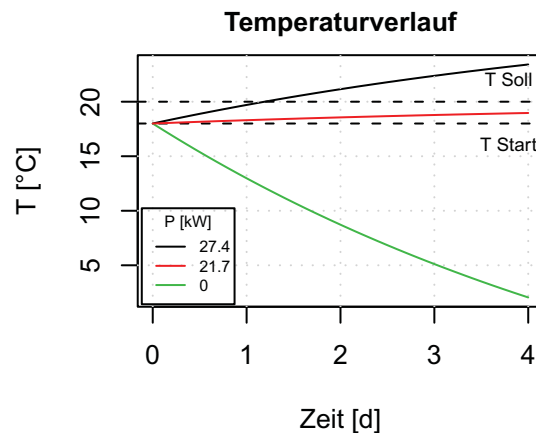


Abbildung 1.1.: Änderung der durchschnittlichen Innentemperatur im Gebäude für unterschiedliche Heizraten P_H .

ter der Randbedingung $T_U = -15\text{ °C}$ und der Anfangsbedingung $T_0 = 18\text{ °C}$ für eine Heizleistung $P_H = P_{\text{Verluste}} = 21,7\text{ kW}$, eine Heizleistung $P_H = 1,3 \cdot P_{\text{Verluste}} = 27,4\text{ kW}$ und ohne aktive Beheizung $P_H = 0\text{ kW}$.

Die thermische Speicherfähigkeit eines Gebäudes führt zu einer deutlichen Dämpfung bzw. Trägheit der Raumwärmelast bezüglich einer Änderung der äußeren Rahmenbedingungen. Diese Dämpfung führt in Kombination mit solaren und internen Gewinnen unter Anderem dazu, dass ab bestimmten Wetterbedingungen keine aktive Beheizung von Gebäuden nötig ist. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass oberhalb einer durchschnittlichen Tagestemperatur zwischen 12 und 15 °C ⁸ keine Heizleistung benötigt wird.

1.4. Norm Heizlast

Zur Bemessung von Wärmeerzeugern wird die Heizlast Φ_{HL} für die Raumheizung nach [DIN EN 12831] durch $\Phi_{HL} = \Phi_T + \Phi_L + \Phi_{RH}$ mit der Aufheizleistung Φ_{RH} bestimmt⁹. Die zugrunde gelegte minimale Außentemperatur ist vom Ort abhängig¹⁰. Im Folgenden wird nach [Jagnow u. Wolff (2003)]¹¹ von einem Aufheizfaktor $F_{RH} = 0,3$ und dementsprechend $\Phi_{RH} = 0,3 \cdot (\Phi_T + \Phi_L)$ bzw.

$$\Phi_{HL} = 1,3 \cdot (\Phi_T + \Phi_L) \quad (1.13)$$

ausgegangen.

⁷Gebäude 1 aus der Gebäudedatenbank

⁸vgl. [DIN 4108]

⁹Aufheizleistung ist der Leistungsüberschuss der nötig ist, um ein Gebäude bei maximaler Transmissions- und Lüftungslast aufzuheizen. Gibt es diese „Leistungsreserve“ nicht, kann an sehr kalten Tagen ein Gebäude nicht aufgeheizt werden, sondern nur auf Temperatur gehalten werden.

¹⁰für Augsburg -14 °C

¹¹Seite 15

1.5. Der Raumwärmebedarf

Die Raumwärmelast Φ_{RW} ergibt sich aus Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten abzüglich der internen und solaren Gewinne

$$\Phi_{RW}(t) = (H_T + H_L)\Delta T(t) - \Phi_i - P_s(t) \quad (1.14)$$

mit der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur $\Delta T(t)$ und H_T , H_L , Φ_i und $P_s(t)$ nach Gleichungen (1.3), (1.2), (1.9) und (1.7). Die Innentemperatur wurde mit 20 °C angesetzt.

Der Raumwärmebedarf zwischen den Zeitpunkten t_0 und t ist durch

$$Q_{RW} = \int_{t_0}^t \Phi_{RW}(t') dt' \quad \forall t' \text{ mit } \Phi_{RW}(t') > 0 \quad (1.15)$$

bestimmt.

1.5.1. Stündliche Auflösung

Für die Berechnung des Raumwärmebedarfs für ein Jahr auf Basis einer stündlichen Auflösung liegen durchschnittliche Außentemperaturen T_a und Globalstrahlungswerte P_{rad} für das Jahr 2006 aus [LfL (2009)] vor. Die in diesem Datensatz vorliegenden Globalstrahlungswerte geben den senkrechten Einfall der Strahlung auf eine horizontale Fläche an. Die senkrechte Strahlungsleistung wurde in Anlehnung an [Herrmann (2006)]¹² in Abhängigkeit der Verteilung der Fensterflächen des jeweiligen Gebäudes in die Himmelsrichtungen proportional zur spezifischen Strahlungsenergiekonstante I_j nach [EnEV (2007)] umgerechnet. Aus Gleichung (1.15) ergibt sich somit der Wärmebedarf Q_{RW}^* je Zeitschritt $\vartheta \in \{1, 2, 3, \dots, 8760\}$ ¹³.

$$Q_{RW}^*(\vartheta) = \Phi_{RW}(\vartheta) \cdot 1h \quad (1.16)$$

Gleichung (1.16) beschreibt ein statisches System ohne die Berücksichtigung des in Abschnitt 1.3 beschriebenen Effekts der Speicherung von Wärmeenergie in der thermischen Masse des Gebäudes¹⁴. Um die Dynamik des Systems aufgrund dieser thermischen Masse zu berücksichtigen wurde zunächst aus Gleichung (1.16) der Wärmebedarf aller Zeitschritte¹⁵ berechnet. Im Anschluss wurde die Dämpfung aufgrund der Speicherkapazität und der Zeitverzögerung der Wärmeleitung durch die Einführung eines gewichteten gleitenden Durchschnitts der Wärmenachfrage Q_{RW} mit dem Gewichtungsfaktor $w(\theta)$ berücksichtigt¹⁶.

$$Q_{RW}^*(\vartheta) = \sum_{\theta}^{\vartheta} (w(\theta) \cdot Q_{RW}(\vartheta - \theta)) \quad (1.17)$$

¹²Seiten 86 ff

¹³Stunde des modellierten Jahres

¹⁴siehe auch Anhang 12.1.3

¹⁵auch für $\Phi_{RW}(t') \leq 0$

¹⁶vgl. Abschnitt 2.9

mit $\theta \in \mathbb{N}_0$ ¹⁷ und der Normierung $\sum^\theta w(\theta) = 1$ ¹⁸.

Negative Raumwärmebedarfe (Kühlbedarfe) werden nicht berücksichtigt:

$$Q_{RW}^*(\vartheta) = \begin{cases} Q_{RW}'^*(\vartheta) & \forall \vartheta \text{ mit } Q_{RW}'^*(\vartheta) > 0 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (1.18)$$

1.5.2. Jahresauflösung

Die Berechnung der Wärmenachfrage in stündlicher Auflösung hat zwei entscheidende Nachteile. Zum einen müssen stündliche Außentemperatur und Globalstrahlungswerte zur Berechnung vorliegen und zum anderen ist die Anzahl der Rechenschritte 8760 Mal größer als mit einer Jahresmethode. Für den Fall, dass für jedes Haus in der Gebäudedatenbank der Raumwärmebedarf ermittelt werden soll ergeben sich hieraus sowohl große Rechenzeiten als auch ein enormer Speicherbedarf. Zur Berechnung der Entwicklung der Wärmebedarfe wird dies mit Hilfe der Berechnung mittels der Jahresmethode umgangen.

Bei der Berechnung des Wärmebedarfs mit der Jahresmethode wird ausgenutzt, dass für Gleichung (1.6) die Auswirkung des Temperaturverlaufs über das gesamte Jahr auf die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste einzig durch das Integral $\int_{t_0}^{t_1} \Delta T(t') dt'$ mit $\Delta T = T_{\text{innen}} - T_{\text{aussen}}$ beschrieben wird. Dieses Integral kann unabhängig vom Gebäude berechnet werden.

$$G_t \equiv \int_{\text{Jahr}} \Delta T(t') dt' \quad \forall t \text{ mit } T_{\text{Tag}} < 12^\circ \text{C} \quad (1.19)$$

G_t sind dabei die Heizgradstunden. Die Annahme von $T_{\text{Tag}} = 12^\circ \text{C}$ als Heizgrenze ist dabei ein Wert für Gebäude heutigen Standards. Bei einer Änderung des Dämmstandards und der Wärmespeicherfähigkeit von Gebäuden ändert sich diese Heizgrenze.

Der Jahresraumwärmebedarf ergibt sich aus

$$Q_{RW} = (H_T + H_L) \cdot G_t - Q_s - Q_i. \quad (1.20)$$

¹⁷im Folgenden $\theta \in \{0, 1, 2, 3, \dots, 15\}$

¹⁸in späteren Rechnungen gilt: $w=(0,1 \ 0,1 \ 0,1 \ 0,1 \ 0,075 \ 0,075 \ 0,075 \ 0,075 \ 0,05 \ 0,05 \ 0,05 \ 0,05 \ 0,025 \ 0,025 \ 0,025 \ 0,025)$

2. Gebäudedatenbank

2.1. Anforderungen an die Gebäudedatenbank

Die Norm-Heizlast und die Wärmebedarfe für alle Augsburger Gebäude sollen im Folgenden nach den in den Abschnitten 1.4 und 1.5 vorgestellten Methoden berechnet werden. Zur Bestimmung des Raumwärmebedarfs sind dem entsprechend für jedes Gebäude eine Reihe von Daten erforderlich. Grundvoraussetzung ist eine Kenntnis über die Gebäudekubatur, also Boden bzw. Grundfläche (A_{GR}), vertikale Mantelfläche (A_M), deren Fensterflächenanteil (f_F) und die Dachfläche (A_D) ebenso wie deren Wärmedurchgangskoeffizienten (U -Werte). Zur Berechnung der Lüftungswärmeverluste benötigt man das Umbaute Volumen V .



Abbildung 2.1.: Gebäudekubatur aus den Daten der Gebäudedatenbank. Quelle [Linder (2010)] Abbildung 41 Seite 100.

Für die parametrische Bestimmung der internen Gewinne und des Warmwasserbedarfs benötigt man die Energiebezugsfläche (A_N). Im Weiteren wird diese Größe zur Berechnung spezifischer Kenngrö-

ßen, z.B. dem spezifischen Wärmebedarf in $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ verwendet. Eine Abschätzung des Warmwasserbedarfs kann über den spezifischen Warmwasserbedarf pro Person und Jahr erfolgen. Dazu ist die Anzahl der Bewohner (N_{Bew}) eines Gebäudes erforderlich.

Im Folgenden soll exemplarisch für die Stadt Augsburg eine Gebäudedatenbank aufgebaut werden anhand der für jedes Gebäude der Wärmebedarf berechnet werden kann. Im Weiteren soll es möglich sein, anhand der Datenbank die zukünftige Entwicklung des Wärmebedarfs, z.B. aufgrund des Klimawandels und der energetischen Sanierungen von Gebäuden abzuschätzen. Dies stellt einen deutlichen Entwicklungsschritt zu vorangegangenen Arbeiten¹ dar.

Die benötigten Daten standen für Augsburg in dieser Form nicht zur Verfügung. Sie wurden im Rahmen einer Diplomarbeit [Linder (2010)] zusammengetragen und in eine verwertbare Form gebracht. Die Daten wurden aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragen, beispielsweise von den Stadtwerken Augsburg, dem Amt für Stadtentwicklung und Statistik der Stadt Augsburg, dem städtischen und staatlichen Vermessungsamt sowie von der Handwerks- und der Industrie und Handelskammer Schwaben.

Die Flächen der thermisch aktiven Hüllflächen der Gebäude konnten aus den Datensätzen Grundfläche (A_{GR}), Umfang der Grundfläche (U_{GR}), Firsthöhe (h_F), Traufhöhe (h_T) und Dachform berechnet bzw. abgeschätzt werden. In Abbildung 2.1 ist für einen Gebäudeblock in Augsburg die Kubatur anhand der Daten der Gebäudedatenbank als Überlagerung auf eine Satellitenaufnahme dargestellt. Es wurden standardisierte Gebäude- bzw. Dachformen berücksichtigt².

Als Energiebezugsfläche wurde im Folgenden immer die Brutto-Geschossfläche (A_{GF}) verwendet. Diese ergibt sich aus der Grundfläche (A_{GR}) und der Anzahl an Geschossen (N_G).

Es konnten keine Daten über den Aufbau der thermischen Gebäudehüllen (Wände, Fenster, Fensteranteil, Sanierungsgrad, Dach, Bodenplatte) wie auch über das Baualter der Gebäude erhoben werden. Das Baujahr der Gebäude wurde mit dem erstmaligen Anschluss der Gebäude an das Trinkwassernetz abgeschätzt.

Um den Gebäuden die fehlenden Informationen über den Aufbau zuzuordnen wurden die Gebäude typisiert. Je nach Gebäudetyp wurden dann jeweils entsprechende typische Eigenschaften zugeordnet.

2.2. IWU-Gebäudetypisierung

Die Gebäudetypisierung nach [IWU (2003)] teilt die Gebäude Deutschlands zum Einen nach Baualtersklassen und zum Anderen in Nutzungsgruppen ein. Diese gliedern sich auf in Einfamilienhaus (EFH), Reihenhaushaus (RH), Mehrfamilienhaus (MFH), großes Mehrfamilienhaus (GMH) und Hochhaus (HH). Daneben gibt es noch einige Sonderfälle des industriellen Wohnbaus. Insgesamt ergibt sich eine Unterscheidung von 44 Gebäudetypen³.

Die Datenbank enthält für jedes der Typgebäude Daten über die Fläche A und den Wärmedurchgangskoeffizienten U der verschiedenen Wand-, Dach- und Bodenbauteile der thermischen Hülle der

¹ z.B. [Winkel Müller (2006)]

² Satteldach, Flachdach, Walmdach, Mansarde, Pultdach.

³ siehe Angang 12.1.4

Gebäude. Ebenso enthält sie den Aufbau, die Fläche, den Wärmedurchgangskoeffizient U und den Strahlungsdurchgangsfaktor g der Fenster. Daneben sind in der Datenbank Daten über Wohnfläche, Höhe, Anzahl der Stockwerke und Anzahl der Wohneinheiten.

Anhand der physikalischen Eigenschaften der thermischen Hülle der Typgebäude wurde nach Gleichung (1.20) der Wärmebedarf der Typgebäude bestimmt. Dabei wurden Heizgradstunden von $G_t = 90 \text{ kWh}$, eine Luftwechselrate von $n_{LW} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ und ein zusätzlicher Wärmebedarf für die Bereitstellung von warmem Wasser nach [EnEV (2007)] von $Q_{WW} = 12,5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ veranschlagt. Die Wärmebedarfe sind in Abhängigkeit der jeweiligen Baualtersklasse in Abbildung 2.2 dargestellt.

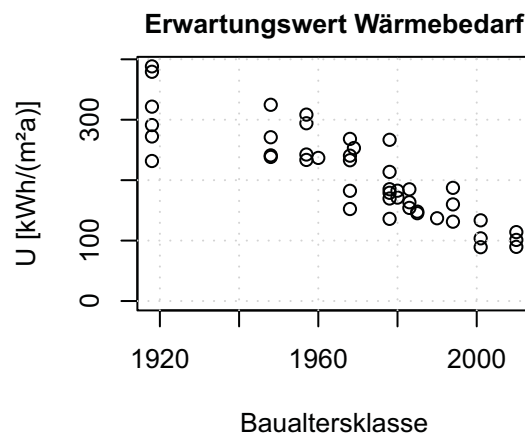


Abbildung 2.2.: Wärmenachfrage der Gebäude nach [IWU (2003)].

Es zeigt sich der deutliche Trend, dass Gebäude jüngeren Baualters aufgrund der im Allgemeinen verbesserten Bauweise geringere spezifische Wärmebedarfe aufweisen sollten.

2.3. Augsburger Gebäude

Die Augsburger Gebäudedatenbank nach [Linder (2010)] beinhaltet insgesamt für Augsburg 266 443 Bewohner und 140 263 Wohneinheiten. Nach Daten des Amts für Stadtentwicklung Augsburg [Gleich (2008)] wohnten 2006 266 976 Personen in 140 459 Wohneinheiten in Augsburg. In Abbildung 2.3 ist die räumliche Verteilung der Bevölkerung in Augsburg wiedergegeben. Im Gegensatz zur [Richter (2004)]⁴ wurde für diese Arbeit eine Einteilung des Stadtgebiets in quadratische Rasterelemente gewählt. Dies birgt besonders dann Vorteile wenn die betrachteten Stadtbezirke bzw. Blöcke in sich nicht homogen sind. Im Folgenden werden sämtliche geographischen Verteilungen auf ein Raster mit der Auflösung 100 x 100 m bezogen und dargestellt. Durch die Rasterung in dieser Auflösung wird gewährleistet, dass keine Rückschlüsse von den gezeigten Eigenschaften der Rasterelemente auf personenbezogene Daten geschlossen werden können.

Die Daten beinhalten insgesamt 38 037 adressierte Hauptgebäude⁵. Davon sind 24 053 reine Wohngebäude (WG), 3433 sind reine Nicht-Wohngebäude (nWG), die restlichen 10 551 Gebäude sind Mischgebäude (MG) mit sowohl gewerblicher bzw. industrieller Nutzung als auch mit Wohnraum.

⁴hier wurden sämtliche Eigenschaften auf Blockebene mit unterschiedlicher geographischer Ausdehnung bezogen

⁵Nebengebäude wie z.B. Garagen sind nicht im Datensatz enthalten.

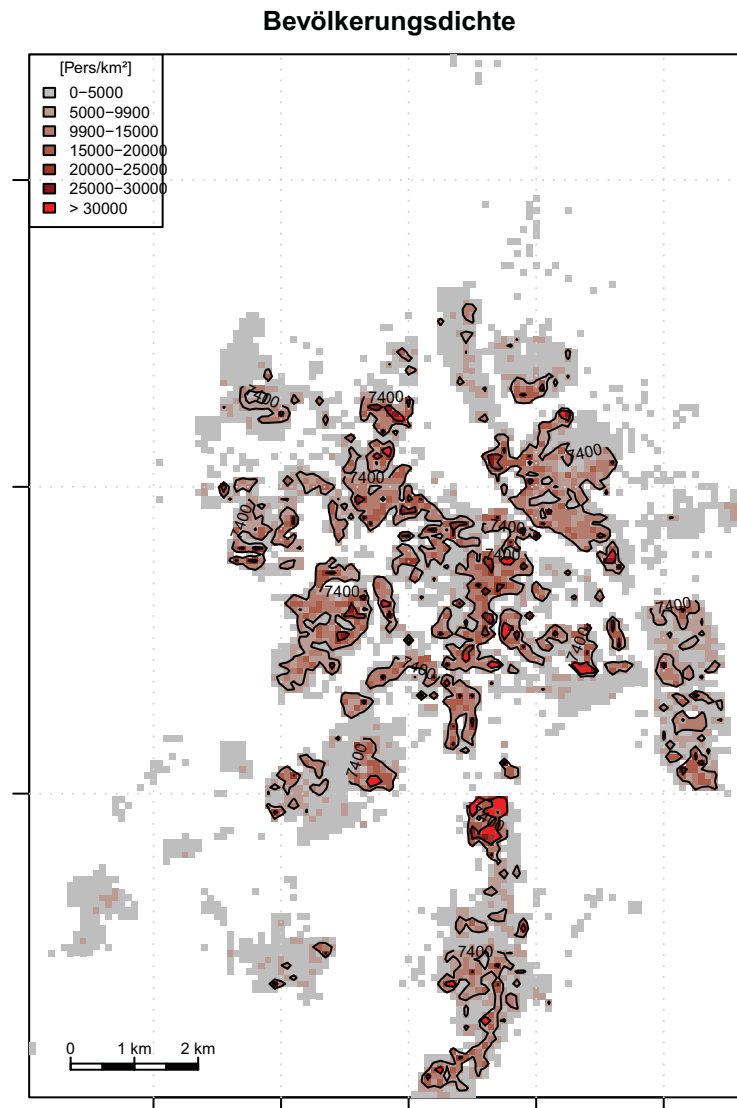


Abbildung 2.3.: Bevölkerungsdichte in Bewohner pro Quadratkilometer. Auflösung 100 x 100 m.

Information über wohn- bzw. gewerbliche Nutzung oder Teilnutzung von Gebäuden liegt in Form von Bewohnerzahlen, beherbergtem Wirtschaftszweig und Abrechnung des Strombezugs⁶ zugrunde. In Abbildung 2.4 sind Gebäudedichten und Verteilungen in unterschiedliche Nutzungsarten gegeben.

⁶nach Kundenzweigen Haushalt, Gewerbe und Industrie

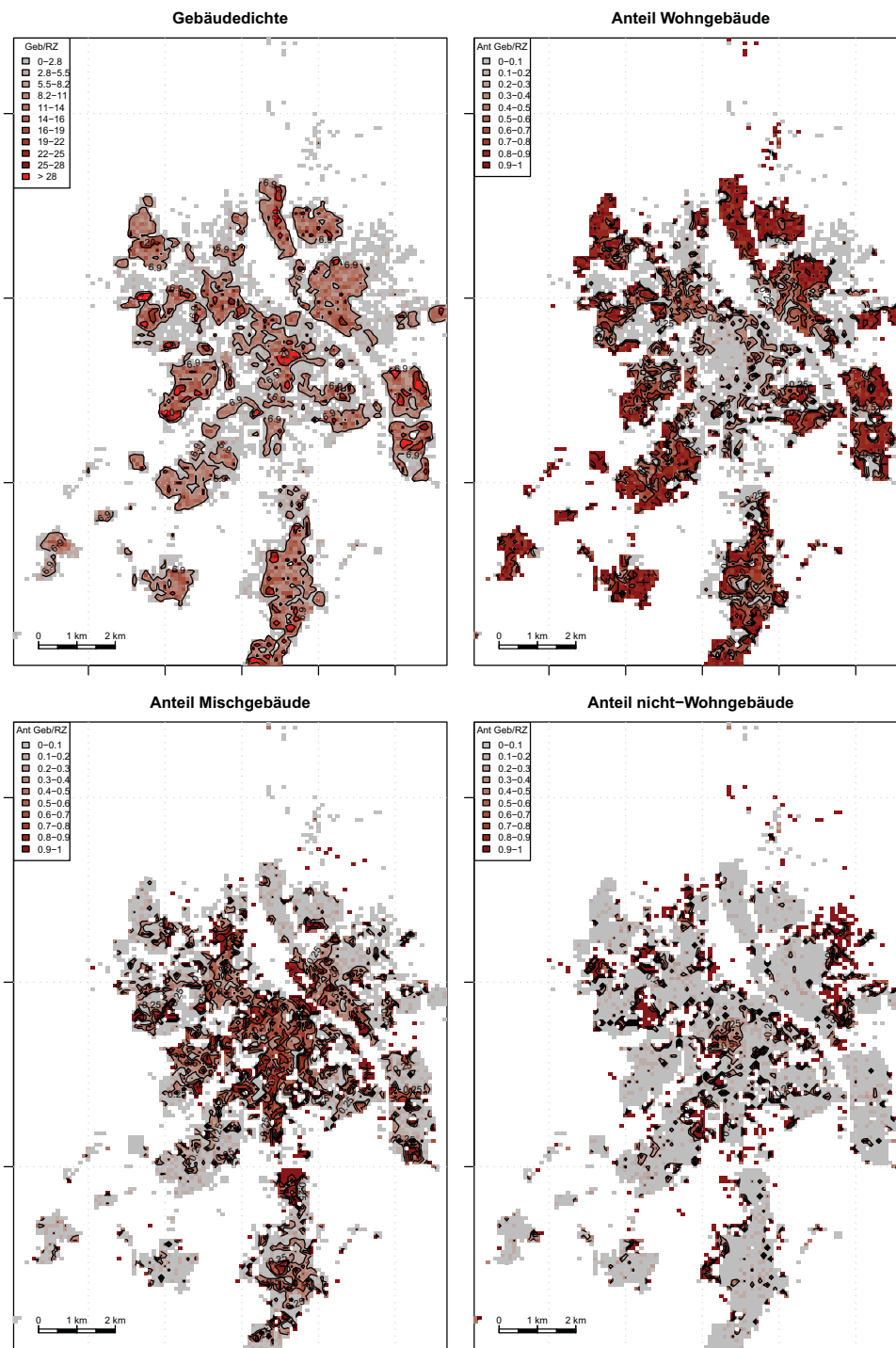


Abbildung 2.4.: Gebäudedichte in Augsburg und Anteil der Wohn-, Misch- und nicht-Wohngebäude. Auflösung der Rasterelemente 100 X 100 m.

2.4. Zuweisung der IWU-Gebäudetypisierung

Um einen gebäudescharfen Wärmebedarf zu generieren wurden die Augsburger Gebäude nicht durch Typ-Gebäude nach [IWU (2003)] ersetzt, sondern der Augsburger Gebäudedatenbank wurden aufgrund der Gebäudetypisierung zusätzliche Attribute wie z.B. Wärmedurchgangskoeffizienten der Wände und Anteil der Fensterfläche je Himmelsrichtung zugewiesen. Für diese Zuordnung wurde jedes Augsburger Gebäude in die IWU-Klassifizierung eingeordnet.

Um jedem einzelnen Augsburger Gebäude ein entsprechendes IWU-Typgebäude zuzuordnen wurde ein zweistufiges Verfahren gewählt. Als entscheidendes Kriterium für die Güte der Gebäudehülle wurde der zur Bauzeit jeweils vorherrschende Stand der Technik zu Grunde gelegt. In der ersten Stufe wurden diesbezüglich für jedes Augsburger Gebäude mit vorhandenem „Baujahr“ (BJ) die IWU-Typgebäude mit nicht übereinstimmender Baualtersklasse für eine Zuordnung ausgeschlossen. Die Verteilung der Augsburger Gebäude auf ihr Baualter ist in Abbildung 2.5 gezeigt.

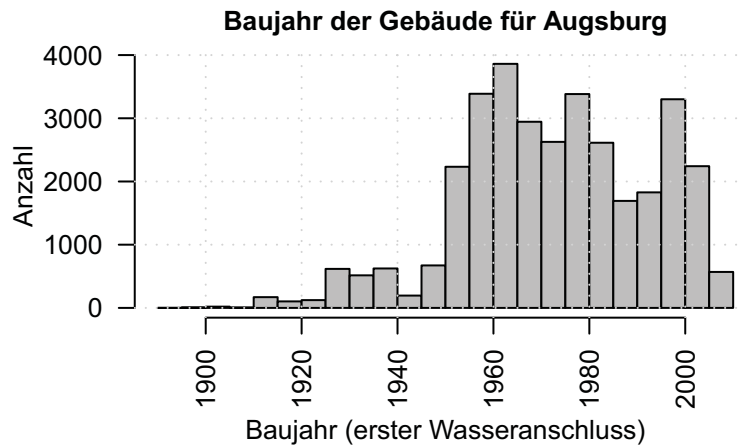


Abbildung 2.5.: Baualter in Augsburg. Das Baualter ergibt sich dabei aus dem Erstanschluss des Gebäudes an das Wassernetz.

In einem zweiten Schritt wurden für die Zuordnung zwischen IWU-Gebäudetyp und dem jeweiligen Augsburger Gebäude vier Attribute ξ definiert. Diese sind Grundfläche (A_{GR}), Geschosszahl (N_G), Geschossfläche (A_{GF}) und Gebäudefirsthöhe (h). Aus diesen Attributen wurde für jeden noch möglichen IWU-Gebäudetyp die Abweichungen der Attribute ξ zwischen IWU-Typgebäude und Augsburger Gebäude nach

$$Abw_i = \sum_{\xi} ((\xi_{IWU} - \xi_{Aug}) w_{\xi})^2 \quad (2.1)$$

bestimmt⁷. w_{ξ} ist dabei ein Gewichtungsfaktor für die unterschiedlichen Attribute⁸. Den Augsburger Gebäuden wird dann dementsprechend jeweils der Gebäudetyp i mit minimaler Abweichung Abw_i

⁷Fehlende Attribute ξ_{Aug} der Augsburger Datensätze wurden nicht zur Berechnung der Abweichung berücksichtigt.

⁸es wurden alle Attribute w_{ξ} gleich gewichtet.

zugeordnet. Für Reihenhäuser gilt zusätzlich die Bedingung, dass mindestens 25% des Gebäudeumfangs an ein Nachbargebäude grenzen müssen. Einfamilienhäuser dürfen maximal mit 50% an ein Nachbargebäude bzw. Nebengebäude grenzen. Abbildung 2.6 zeigt die Verteilung der Zuordnung der IWU-Gebäudetypen auf die Augsburger Gebäude.

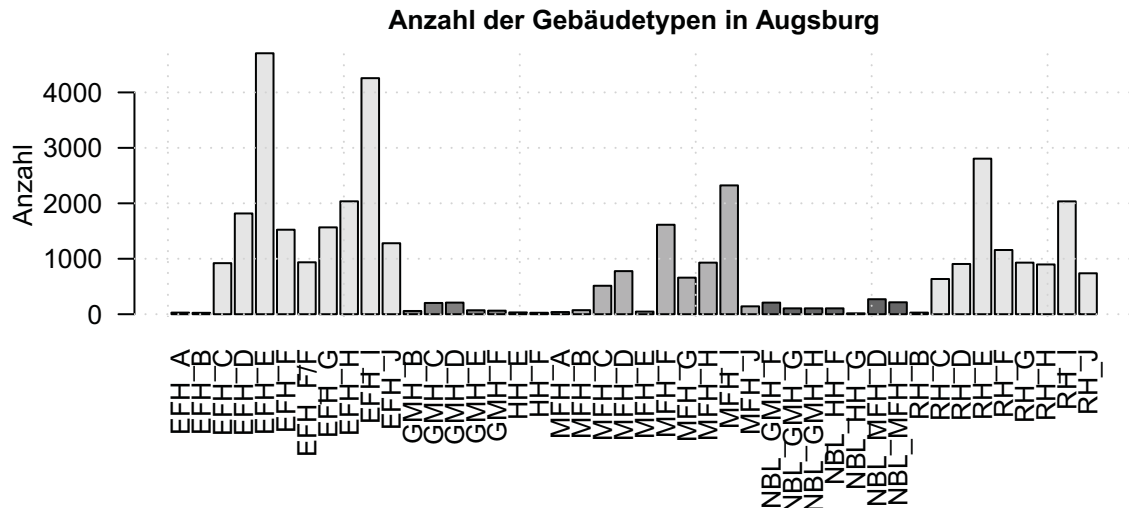


Abbildung 2.6.: Häufigkeit der IWU-Gebäudetypen in Augsburg.

2.5. Vollständigkeit der Daten

In der Augsburger Gebäudedatenbank ist eine große Anzahl von Datensätzen unvollständig⁹. Daneben stehen einige Datensätze redundant zur Verfügung bzw. stehen in gegenseitigem Verhältnis. Beispielsweise ist eine näherungsweise lineare Beziehung zwischen Gebäudehöhe und Anzahl der Geschosse zu erwarten. Aus diesen Redundanzen wurde versucht fehlende Daten zu ermitteln um mit einem möglichst vollständigen Datensatz für Augsburg arbeiten zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit und der angegliederten Diplomarbeit [Linder (2010)] war es nicht möglich direkt Daten über das Baualter der Augsburger Gebäude zu erlangen. Um dennoch eine Aussage über das Baualter treffen zu können wurde das Datum der erstmaligen Erschließung des jeweiligen Gebäudes an das Wasserversorgungsnetz als Baualter angenommen. Für die Zuordnung eines IWU-Gebäudetyps zu den Augsburger Gebäuden ist das Baualter der Augsburger Gebäude zwingend erforderlich. Für 4298¹⁰ Gebäude liegt kein Baualter vor. Um diese Gebäude dennoch für die Berechnung des städtischen Wärmebedarfs berücksichtigen zu können wurde diesen Gebäuden im Folgenden für das Baujahr das Jahr 2000 angesetzt. Dies führt zu einer Überrepräsentation von Gebäudetypen dieser Altersklasse (siehe z.B. Abbildung 2.10 Gebäudetyp MFH_I).

Im Weiteren fehlen für 8954 Gebäude die jeweilige Höhe bzw. Geschosszahl. Für 3393 dieser Gebäude ist weder Gebäudehöhe noch Geschosszahl bekannt. Für letztere kann die Kubatur anhand der Datensätze weder berechnet noch zufriedenstellend abgeschätzt werden. Um diese Gebäude dennoch zur

⁹ siehe Anhang 12.1.5 Abbildungen 12.3 bzw. vergleiche [Linder (2010)]

¹⁰ 11,3%

Berechnung des städtischen Wärmebedarfs berücksichtigen zu können, wurden ihnen die Datensätze Traufhöhe, Firsthöhe und Anzahl Vollgeschosse aus der IWU-Gebäudetypisierung zugewiesen.

Für die Gebäude mit zumindest einem der beiden Daten, Gebäudehöhe bzw. Geschossanzahl, wurden die jeweils fehlende Daten abgeschätzt. Für die Abschätzung wurde der lineare Trend für die mittlere Gebäudehöhe in Abhängigkeit der Anzahl der Geschosse bestimmt (Abbildungen 2.7 und 2.8).

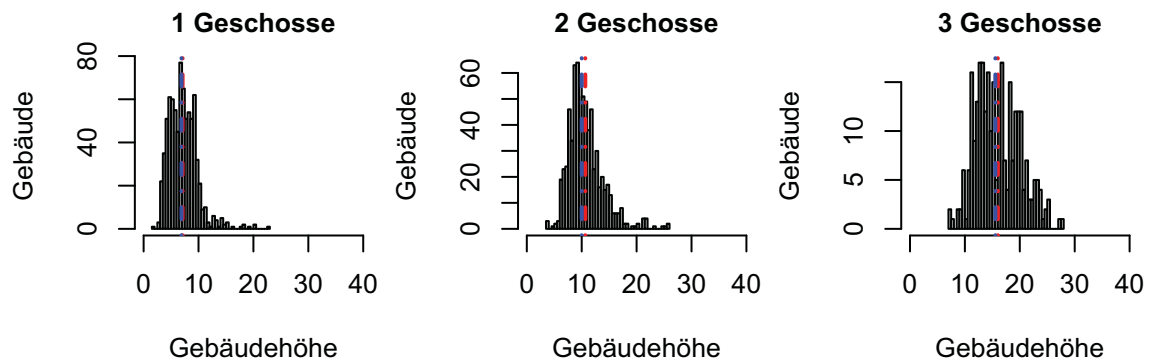


Abbildung 2.7.: Verteilung und Mittelwert (rote Linie; Median: blaue Linie) der Gebäudehöhe in Abhängigkeit der Anzahl der Geschosse.

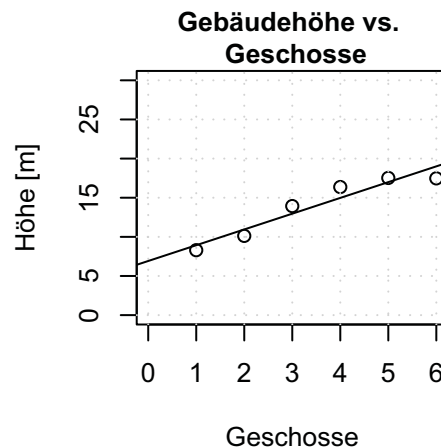


Abbildung 2.8.: Linearer Fit der mittleren Gebäudehöhe in Abhängigkeit der Geschosshöhe.

Abbildung 2.9¹¹ zeigt eine Karte bezüglich der Qualität bzw. der Vollständigkeit der Gebäudedatensätze nach Anwendung der oben genannten Methoden zur Datenvervollständigung für das Augsburger Stadtgebiet. Dabei weisen dunkelgrüne Bereiche eine relativ hohe Vollständigkeit der Höhen- und Baujahrsdatensätze¹², rote Bereiche eine relativ geringe Vollständigkeit¹³ aus. Über große Bereiche des Stadtgebietes ergibt sich eine hohe Vollständigkeit der Datensätze.

¹¹ Im Anhang 12.1.5 sind die Verteilungen der Qualität weiterer Datensätze gezeigt.

¹² zwischen 83 und 100%

¹³ zwischen 0 und 17%

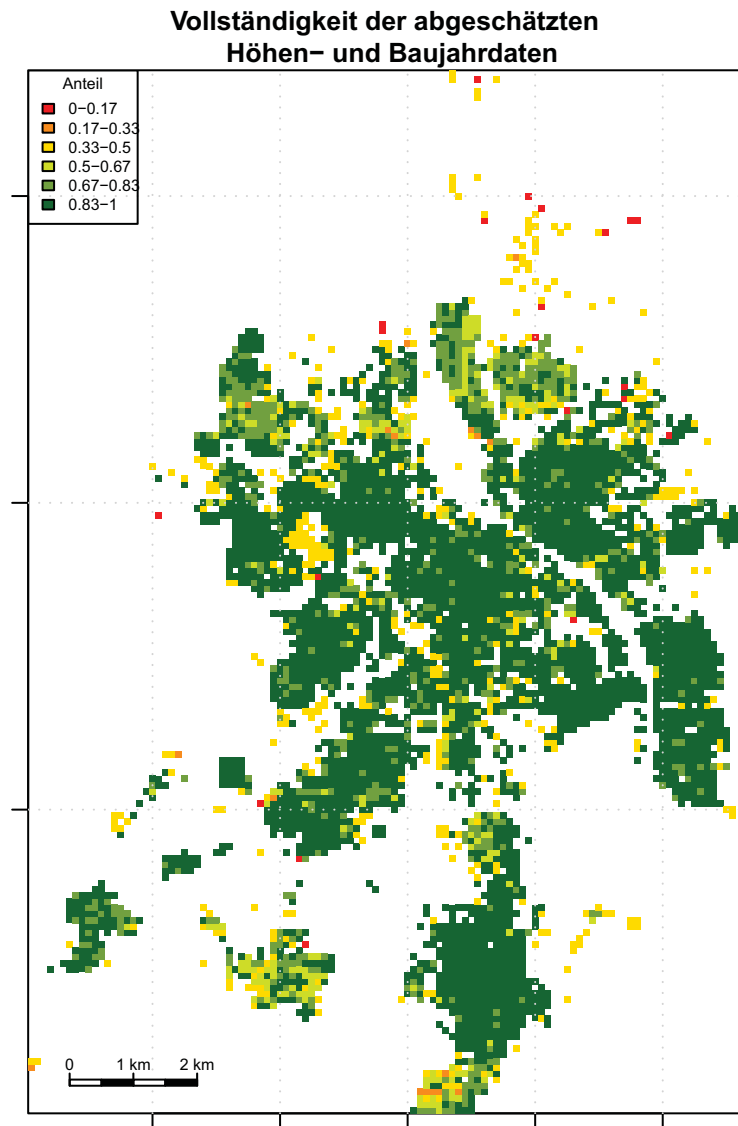


Abbildung 2.9.: Anteil vollständiger Baujahr- und Höhendatensätze pro Rasterelement. Auflösung der Rasterelemente 100 X 100 m.

2.6. Geschossfläche

Sowohl zur Abschätzung der Wärmenachfragen, als auch als Bezugsgröße für den Wärmebedarf spielt die Geschossfläche (A_{GF}) eine wichtige Rolle. Dabei wird im Folgenden als Geschossfläche die brutto Geschossfläche aus brutto Grundfläche mal Anzahl Vollgeschosse angesetzt. Abbildung 2.10 zeigt sowohl die Verteilung der Geschossfläche auf die Gebäudetypen als auch auf die Art der Nutzung der Gebäude¹⁴, Abbildung 2.12 die Verteilung der Geschossfläche auf das Augsburger Stadtgebiet. Dargestellt ist die Geschossflächenzahl GFZ . Diese gibt das Verhältnis zwischen Geschossfläche und Bezugsfläche an und ist ein Maß für die Dichte der Bebauung im jeweiligen Rasterelement. Es zeigt

¹⁴WG, MG, nWG

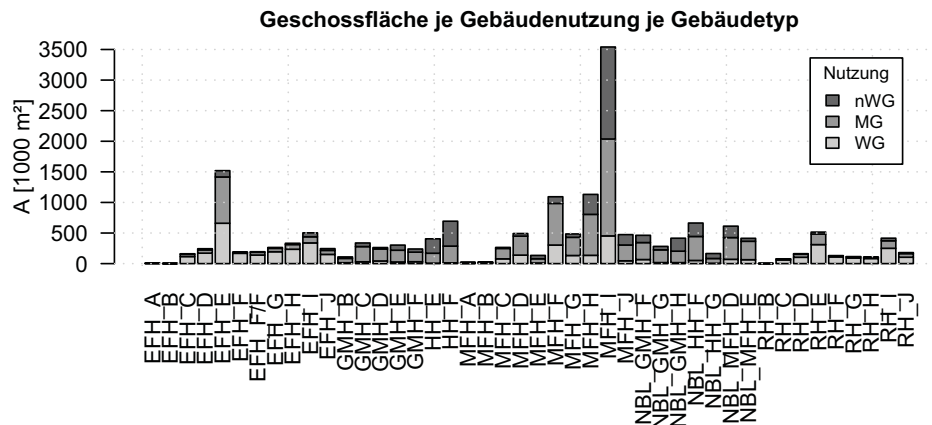


Abbildung 2.10.: Geschossfläche der Gebäude nach Nutzung (Wohngebäude (WG), Mischgebäude (MG) und nicht-Wohngebäude (nWG)) je IWU-Gebäudetyp in Augsburg.

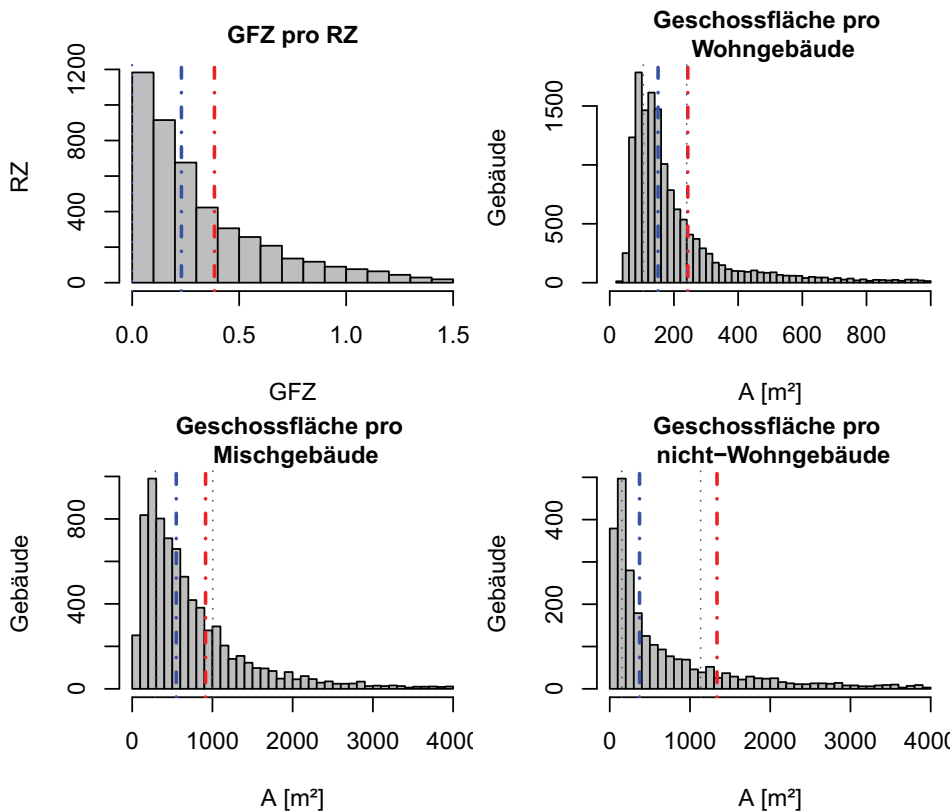


Abbildung 2.11.: Geschossflächenzahl (GFZ) pro Rasterzelle (oben links) und Geschossflächen pro Gebäude für die unterschiedlichen Nutzungsklassen. Die rot gestrichelte Linie gibt den Mittelwert, die blaue gestrichelte Linie den Median der Verteilung an. Blau gepunktete Linien geben erstes bzw. drittes Quartil an.

sich, wie zu erwarten im Stadtkern eine deutlich höhere *GFZ* als in den Randgebieten. In Abbildung 2.11 links oben ist die Verteilung der Geschossflächenzahlen auf die Rasterelemente dargestellt. Im

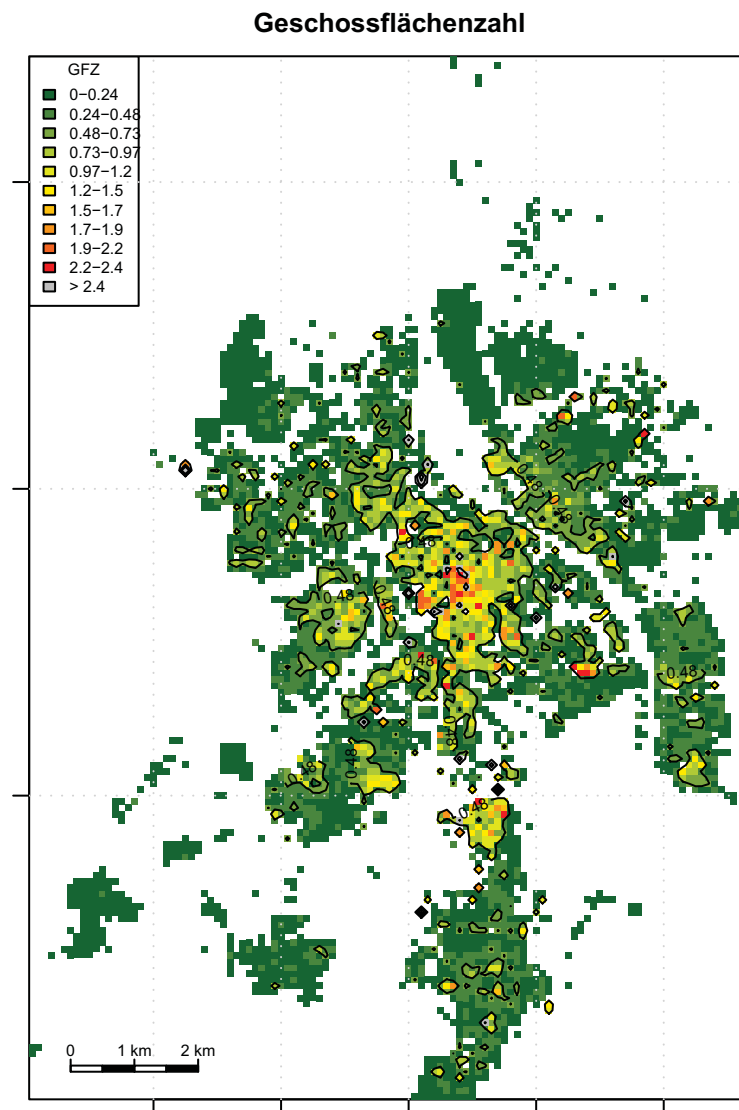


Abbildung 2.12.: Geschossflächenzahl pro Rasterelement. Auflösung der Rasterelemente 100 X 100 m.

Weiteren sind in Abbildung 2.11 die Verteilung der Geschossfläche je Wohngebäude, je Mischgebäude bzw. je nicht-Wohngebäude abgebildet.

2.7. Gebäudehülle

Für die spätere Bestimmung der Wärmebedarfe der Gebäude ist die thermisch aktive Austauschfläche zwischen Innen- und Außenraum von entscheidender Bedeutung. Die thermische Hülle wird anhand der vorhandenen Gebäudeparameter abgeschätzt und in drei Bereiche eingeteilt. Dachfläche A_{ob} , Bodenfläche A_{unt} und vertikale Wandfläche A_{Luft} .

Die Bodenfläche entspricht der Grundfläche A_{GR} aus den Primärdaten des Wärmeetlas. Die Ermittlung der Dachfläche der Augsburgur Gebäude wird anhand der Grundflächenzahl und des spezifischen Verhältnisses Dachfläche zu Grundfläche der unterschiedlichen Gebäudetypen der IWU-Gebäudedatenbank realisiert. Die thermisch aktive vertikale Mantelfläche der Augsburgur Gebäude wird in Abhängigkeit der Dachform bestimmt.

Satteldach

$$A_{\text{Luft}} = (h_T \cdot U + (h_F - h_T) \cdot x_k) f_{\text{oA}} \quad (2.2)$$

Mansardendach

$$A_{\text{Luft}} = (h_T \cdot U + (h_F - h_T) \cdot x_k) f_{\text{oA}} \quad (2.3)$$

Flachdach

$$A_{\text{Luft}} = (h_F \cdot U) f_{\text{oA}} \quad (2.4)$$

Pultdach

$$A_{\text{Luft}} = (h_T \cdot U + (h_F - h_T) \cdot x_l) f_{\text{oA}} \quad (2.5)$$

Walmdach

$$A_{\text{Luft}} = (h_T \cdot U) f_{\text{oA}} \quad (2.6)$$

sonst

$$A_{\text{Luft}} = (h_T \cdot U) f_{\text{oA}} \quad (2.7)$$

mit

| | |
|-------------------|--|
| A_{Luft} | thermisch aktive vertikale Mantelfläche [m ²], |
| h_T | Traufhöhe [m], |
| h_F | Firsthöhe [m], |
| U | Umfang [m], |
| x_k | Länge der kurzen Gebäudeseite [m], |
| x_l | Länge der langen Gebäudeseite [m], |
| f_{oA} | Anteil des Gebäudes der nicht direkt an ein benachbartes Gebäude / Nebengebäude stößt. |

2.8. Ist-Wärmenachfrage

21 422 ¹⁵ der Gebäude werden mit Gas bzw. Fernwärme versorgt. Abbildung 2.13 zeigt die räumliche Verteilung des Gasbezugs über das Augsburgur Stadtgebiet, Abbildung 2.14 die Verteilung bzw. den Anteil der Fernwärme zur Wärmeversorgung im Fernwärmegebiet. Gas und Fernwärme werden sowohl zur Raumwärme und Warmwasser Bereitstellung als auch für die Erzeugung von Prozesswärme genutzt.

¹⁵56,3%

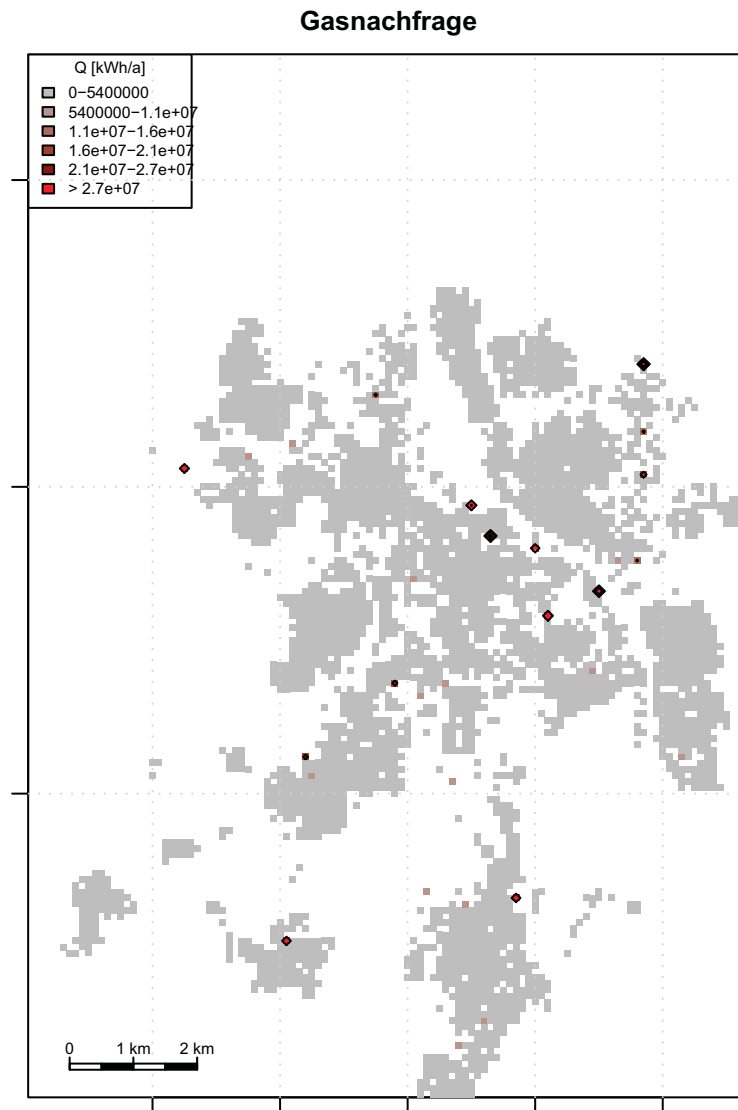


Abbildung 2.13.: Gasnachfrage 2006.

Abbildung 2.15 zeigt die Verteilung des spezifischen Endenergiebedarfs aller Augsburger Gebäude aufgrund der Datenlage für das Jahr 2006. Die Gasnachfrage in Wohngebäuden (Abbildung 2.16 links) verteilt sich hauptsächlich auf einen Bereich zwischen 0 und 600 kWh m⁻² a⁻¹ wobei der Bedarf bei der Hälfte aller Gebäude zwischen 130 und 250 kWh m⁻² a⁻¹ liegt¹⁶. Der Mittelwert der Gasnachfrage für Wohngebäude liegt bei 203 kWh m⁻² a⁻¹. Die Verteilung für Misch- und nicht-Wohngebäude (Abbildung 2.16 rechts) zeigt einen ähnlichen Verlauf jedoch mit deutlich höherer Anzahl an Ausreißern nach oben und unten.

Der maximale spezifische Endenergiebedarf eines Gebäudes liegt bei über 4 000 000 kWh m⁻² a⁻¹. 381 Gebäude weisen einen spezifischen Endenergiebedarf größer 800 kWh m⁻² a⁻¹ auf. Im Folgen-

¹⁶Für alle Verteilungsdiagramme geben blau gepunktete Senkrechte 1. bzw. 3. Quartil an; blau gestrichelte den Median und rot gestrichelte den Mittelwert.

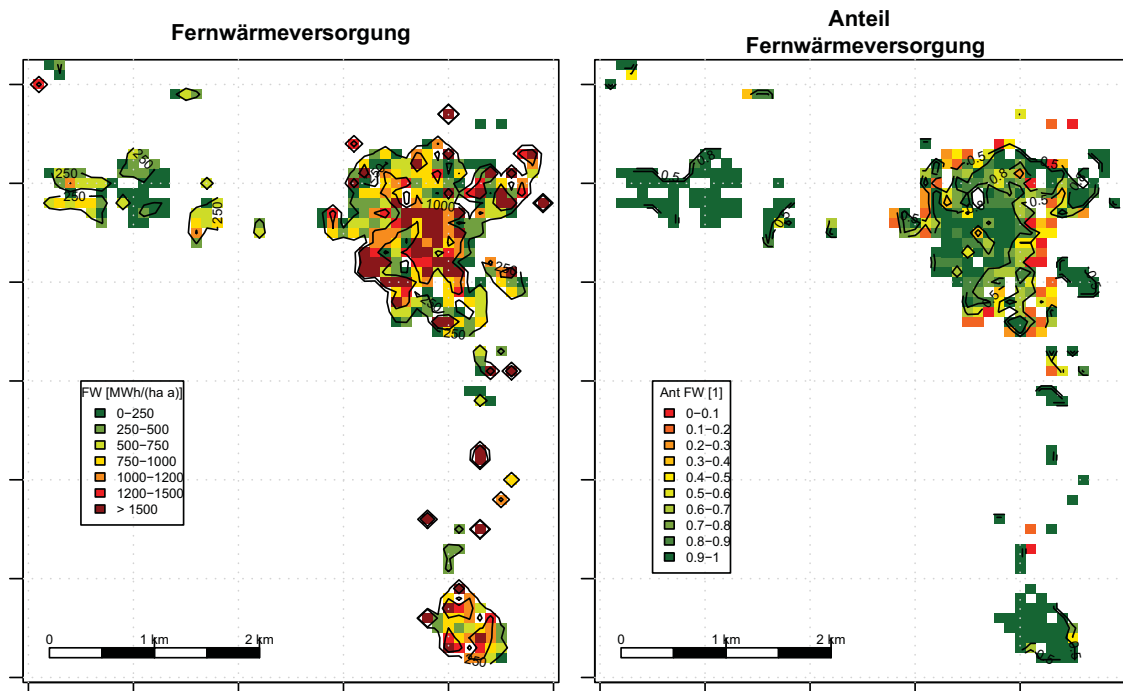


Abbildung 2.14.: Fernwärmenachfrage 2006 und deren Anteil an der Gesamtnachfrage (FW + Gas).

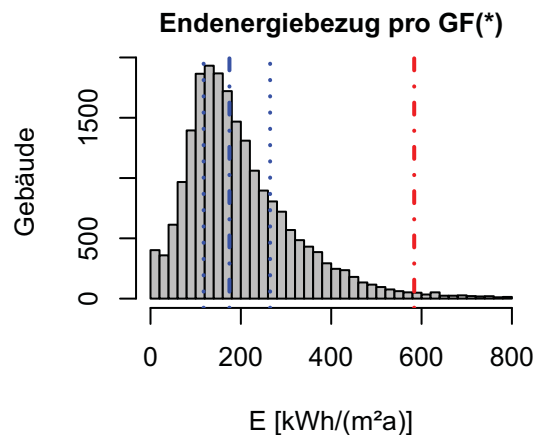


Abbildung 2.15.: Spezifischer Wärmebezug pro Geschossfläche (GF) aller Gas bzw. FW versorgter Gebäude. Die rote Linie zeigt den Mittelwert, die blau gestrichelte Linie den Median der Verteilung. Die blau gepunkteten Linien zeigen erstes bzw. drittes Quartil.

den wird davon ausgegangen, dass diese Endenergiebedarfe aus Prozesswärmenachfragen resultieren. Diese Prozesswärmenachfragen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Sie müssen gegebenenfalls in Einzelbetrachtungen untersucht werden.

Für die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung wurden aus Gas und Fernwärme in Augsburg 2006 demnach 1777 GWh Endenergie eingesetzt. Davon entfielen auf die Wohngebäude 495 GWh, auf Mischgebäude 909 GWh und auf nicht-Wohngebäude 374 GWh. Abbildung 2.17 zeigt die Vertei-

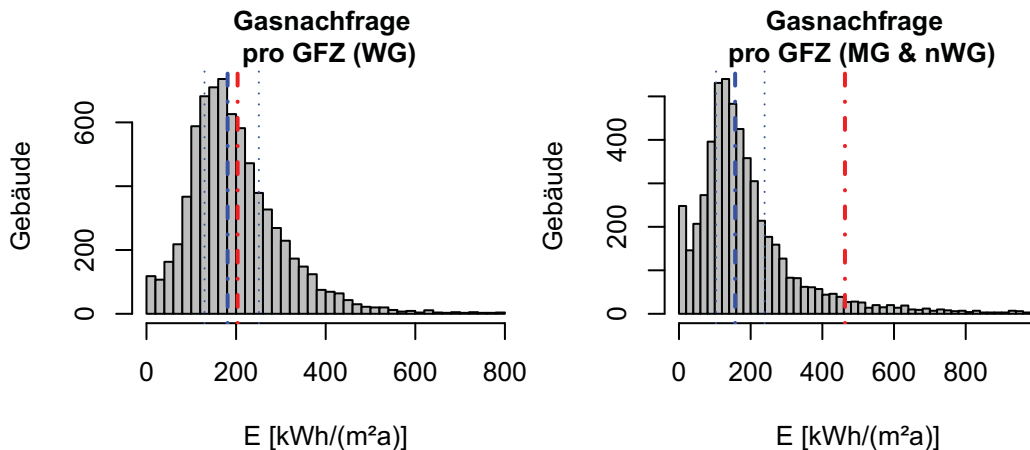


Abbildung 2.16.: Gasnachfrage pro Geschossfläche (GF). Links Wohngebäude (Mittelwert 203); rechts Misch- und nicht-Wohngebäude.

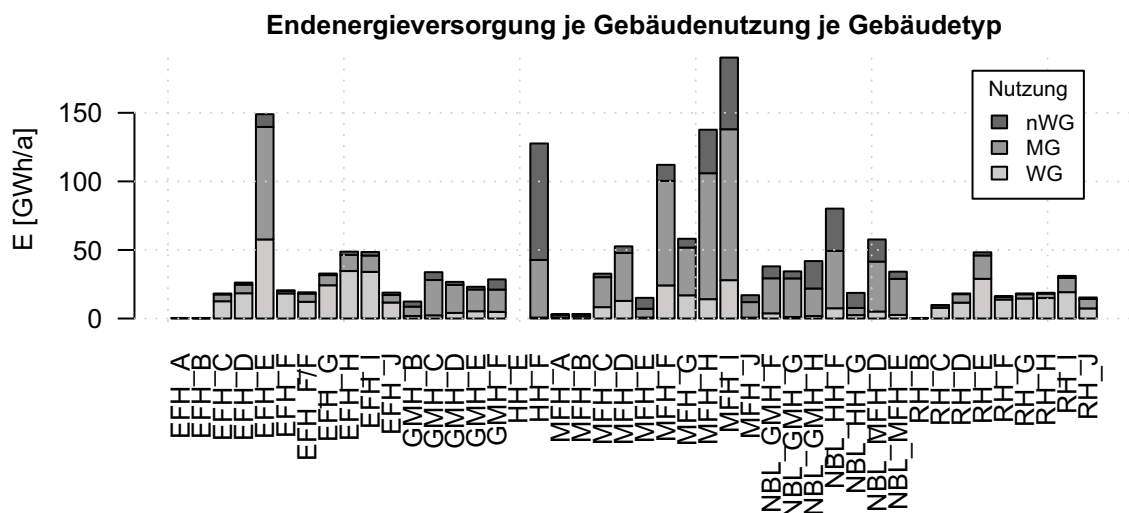


Abbildung 2.17.: Wärmebezug aller Gas bzw. FW Versorgter Gebäude.

lung der Nachfragen auf die Gebäudetypen.

Die gewichteten Mittelwerte¹⁷ für die drei Nutzungsarten (WG, MG, nWG) sind in Tabelle 2.1 gegeben. Im Mittel weisen Gebäude ohne Wohnnutzung einen geringeren spezifischen Endenergiebedarf auf als Wohngebäude. Dies kann z.B. durch den hohen Anteil an eher großen Gebäuden (vergleiche Abbildung 2.10), geringere Soll-Innentemperaturen, geringere Nutzungsdauer¹⁸ und höhere interne Wärmegewinne erklärt werden.

¹⁷Im Folgenden gilt für den gewichteten Mittelwert die Definition: $\frac{\sum_i (E_i)}{\sum_i (A_{GF_i})}$ Summe des Wärmebezugs aller städtisch versorgter Gebäude eines Typs pro gesamter Geschossfläche des Typs. Für den (ungewichteten) Mittelwert: $\frac{\sum_i (E_i/A_{GF_i})}{|i|}$ (mit $|i| \equiv$ Kardinalität i)

¹⁸evtl. längere Nachtab senkung und Temperaturabsenkung an Wochenenden

| Nutzung | spezifischer Wärmebedarf [kWh/(m ² a)] | spezifischer Wärmebedarf bezogen auf Wohngeb. [%] |
|-------------------|--|--|
| Wohngebäude | 176 | 100,0 |
| Mischgebäude | 156 | 88,6 |
| nicht-Wohngebäude | 148 | 84,0 |
| alle Gebäude | 159 | 90,3 |

Tabelle 2.1.: Spezifischer Wärmebedarf nach Art der Gebäudenutzung.

Der spezifische Endenergiebezug der Augsburger Wohngebäude¹⁹ in Abhängigkeit vom Baualter des Gebäudes ist in 2.18 zu sehen. Es zeigt sich eine nahezu vom Baujahr unabhängige Verteilung der

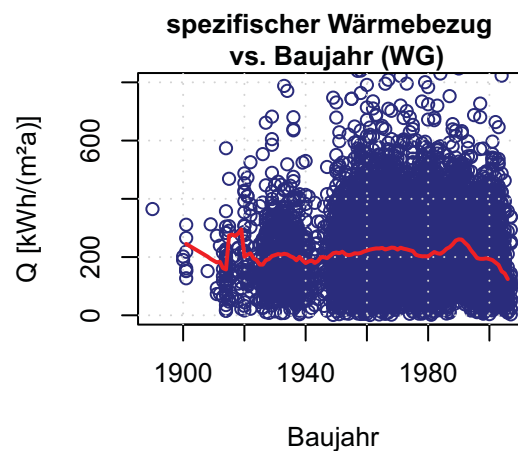


Abbildung 2.18.: Spezifischer Wärmebezug pro GF in Abhängigkeit des Baujahres (Wohngebäude).

Nachfrage. Erst seit Anfang der 1990er Jahre zeigt sich tendenziell der Trend zu geringeren spezifischen Wärmebedarfen. Dieser Trend ist nach Abbildung 2.19 für alle Gebäudetypen (EFH, RH, MFH und GMFH+HH) gleichermaßen zu beobachten. Als ein Grund für diesen Rückgang der spezifischen Wärmenachfragen kann die Einführung der 2. bzw. 3. Wärmeschutzverordnung im Jahre 1984 bzw. 1995 und die anschließende Einführung der Energieeinsparverordnungen ab 2002 (z.B. [EnEV (2007)]) angeführt werden. Nach dem Datensatz weisen Gebäude aus den späten 1980er und früheren 1990er Jahren die höchsten spezifischen Wärmebedarfe von im Mittel ca. $260 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ auf.

Aufgrund des geringeren Oberfläche zu Volumen-Verhältnisses von größeren Gebäuden weisen Mehrfamilien (MFH) und große Mehrfamilienhäuser (GMFH) tendenziell niedrigere spezifische Wärmebedarfe als Einfamilien- und Reihenhäuser auf. Für die Baujahre nach 1960 kann dieser Zusammenhang nur bedingt gefunden werden. Dies könnte darauf hinweisen, dass größere Gebäude aus dieser Zeit aus heutiger Sicht eher unzureichende thermische Eigenschaften aufweisen.

Vergleicht man den tatsächlichen spezifischen Wärmebedarf der Augsburger Gebäude in Abhängigkeit des zugeordneten IWU-Typgebäudes mit der spezifischen Wärmenachfrage nach IWU zeigt sich für Gebäude der Altersklassen G und H²⁰ gute Übereinstimmung (Abbildung 2.20). Gebäude älteren

¹⁹Gas- und Fernwärmebezug 2006

²⁰Altersklassen A & B vor 1918, C 1919-1948, D 1949-1957, E 1958-1968, F 1969-1978, G 1979-1983, H 1984-1994, I 1995-2001, J nach 2002

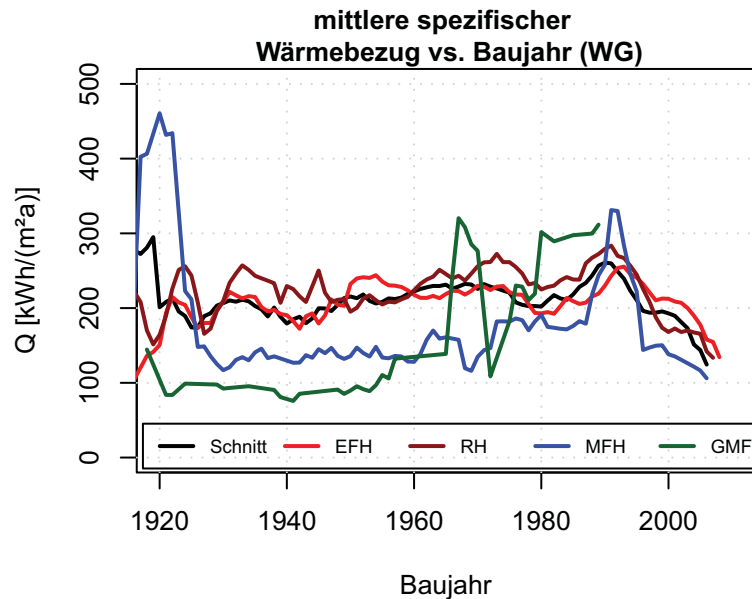


Abbildung 2.19.: Spezifischer Wärmebezug pro GF in Abhängigkeit des Baujahres für die verschiedenen IWU-Klassen (EFH, RH, MFH, GMFH+HH) (Wohngebäude).

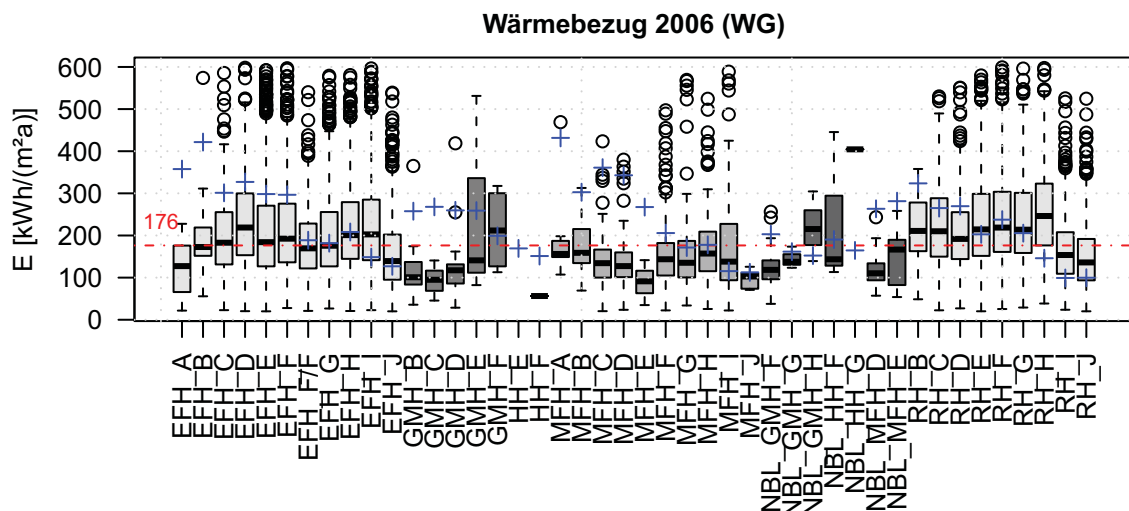


Abbildung 2.20.: Spezifischer Wärmebezug (Fernwärme- und Gasverbrauch 2006) der Augsburger Wohngebäude in Abhängigkeit des IWU-Gebäudetyps (Darstellung der Gebäude innerhalb des ersten und dritten Quartils als grauer Bereich; Median als dicke Linie und Minimum und Maximum bzw. Ausreißer) und Wärmebedarf des Heizsystems (bei Annahme 90% Wirkungsgrad) des jeweiligen IWU-Typgebäudes (blaue Kreuze). Der gewichtete mittlere Wärmebezug aller Wohngebäude liegt bei 176 kWh/(m²a).

Baujahres weisen im Schnitt geringere Nachfragen auf als nach IWU zu erwarten. Gebäude mit Baujahr nach 1995 zeigen tendenziell höhere Bedarfe als nach IWU zu erwarten (vergleiche [Reiter u. a.

(2009))].

2.9. Jahresverlauf der Wärmenachfrage

Messdaten über den Verlauf der Wärmelast von Gebäuden liegen nicht vor. Um Energiesysteme aussagefähig beschreiben zu können ist jedoch der zeitliche Verlauf von Energienachfragen von entscheidender Bedeutung. Um neben den integralen Jahreswerten für den Energiebezug in Augsburg Aussagen über den zeitlichen Verlauf der Wärmelast treffen zu können wurden weitere Daten untersucht. Für das Augsburger Fernwärmegebiet liegt die Wärmelast der Einspeisung in das Fernwärmenetz in stündlicher- und in Tagesauflösung vor. In Abbildung 2.21 sind die Tagesmittel der zur Verfügung stehenden Daten dargestellt.

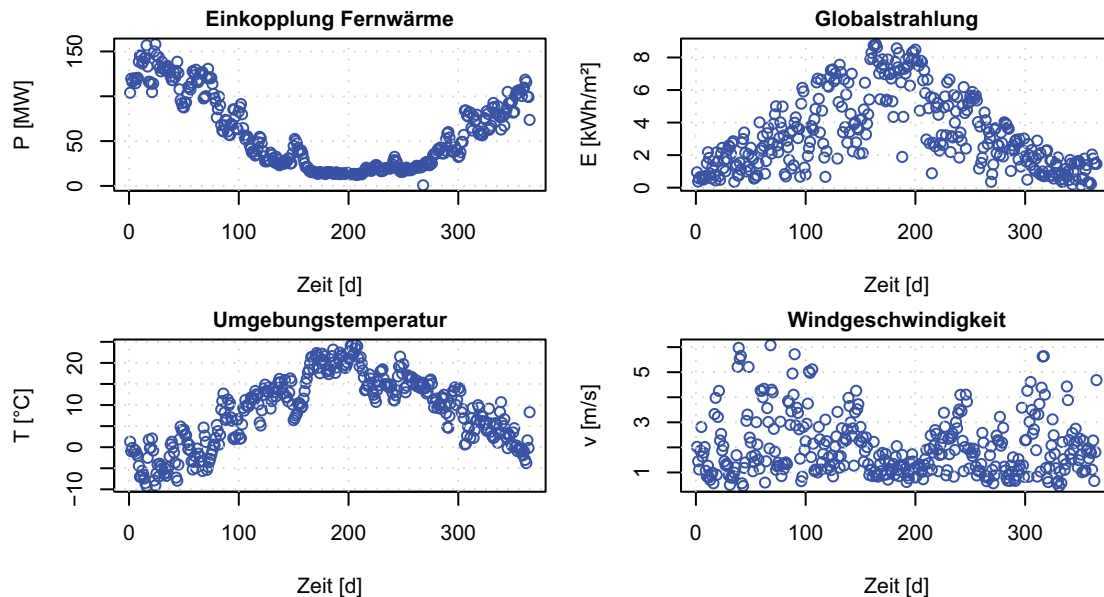


Abbildung 2.21.: Fernwärmebezug, Tagesdurchschnittstemperaturen, Tagesglobalstrahlung und mittlere Windgeschwindigkeiten für das Jahr 2006.

Anhand der Daten wurde der Zusammenhang zwischen Wetterdaten und Raumwärmelast im Fernwärmegebiet untersucht. Durch die Gleichungen (1.1) und (1.5) ist ein linearer Zusammenhang zu erwarten. Dieser wurde durch das lineare Modell

$$\vec{P}_{FW} = \beta_0 + \bar{X}_{Wetter} \cdot \vec{\beta}_{Wetter} + \vec{\epsilon}. \quad (2.8)$$

mit

| | |
|------------------------|---------------------------------------|
| \vec{P}_{FW} | Fernwärmeeinspeisung, |
| β_0 | Achsenabschnitt des linearen Modells, |
| \bar{X}_{Wetter} | Matrix der Wetterdaten, |
| $\vec{\beta}_{Wetter}$ | Vektor der Variablen und |
| $\vec{\epsilon}$ | Abweichung |

aufgestellt.

Im Abschnitt 1.3 wurde die Auswirkung der passiven Speicherung von Wärme in Gebäuden beschrieben. Dieser dynamische Prozess kann durch den statischen Ansatz aus Gleichung (2.8) mit den jeweiligen täglichen Wetterbedingungen nicht beschrieben werden. Um diese Beschränkung des linearen Modells zu umgehen wurde der Ansatz gewählt, neben der Abhängigkeit der Einspeisung in das Fernwärmenetz von den jeweiligen Tageswetterdaten eine Abhängigkeit von den Tagesdurchschnittstemperaturen der vorangegangenen Tage zu berücksichtigen. Ebenso wurden Durchschnittstemperaturen längerer Zeitperioden berücksichtigt.

Daneben wurden aus den mittleren Windgeschwindigkeiten und der Tagesdurchschnittstemperatur der Datensatz

$$vT_{\text{Wind}}(t) = v_{\text{Wind}}(t) \cdot T(t) \quad (2.9)$$

generiert, der eine Abhängigkeit zum Wärmetransport des Windes berücksichtigen soll.

Betrachtet man die Einspeisung ins Fernwärmenetz zeigt sich über die Sommermonate ein nahezu konstanter Wert. Es kann davon ausgegangen werden, dass es zu diesen Zeiten keinen Raumwärmebedarf gibt. Vielmehr ist davon auszugehen, dass es in den Sommermonaten eher zu einer Überhitzung in den Gebäuden kommt, die nicht durch das Heizungssystem ausgeglichen werden kann. Eine Linearität zwischen Nachfrage (und somit Einspeisung) und dem Wetter ist somit an diesen Tagen nicht mehr gegeben. Diesbezüglich werden Tage an denen die durchschnittliche Temperatur 12°C übersteigt nicht im linearen Modell berücksichtigt.

Insgesamt wurden die Zusammenhänge zwischen Fernwärmenachfrage und den folgenden Datensätzen untersucht. Diese waren: die jeweils aktuelle Tagesdurchschnittstemperatur (T), die jeweiligen Tagesdurchschnittstemperaturen der vorangegangenen Tage ($T_{-1}, T_{-2}, T_{-3}, T_{-4}, T_{-5}, T_{-6}, T_{-7}$), die Durchschnittstemperatur einer vorgegebenen Zeitperiode ($T_{-2\text{mean}}, T_{-3\text{mean}}, T_{-4\text{mean}}, T_{-7\text{mean}}$), die Tagesglobalstrahlung E_G , die Windgeschwindigkeit v_{Wind} und der Wärmetransport des Windes vT_{Wind} .

Zur Identifikation des endgültigen linearen Modells wurde das lineare Modell mit oben beschriebenen Parametersätzen aufgestellt und sukzessive der Parametersatz bzw. die Variable mit geringster Signifikanz eliminiert. Für das endgültige lineare Modell wurden die Datensätze mit hoher Signifikanz²¹ als Ausschlaggebend eingestuft. Die Berechnung des linearen Modells wurde über die Software **R** realisiert. Datensätze mit geringerer Signifikanz wurden im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,976$ ist die Lösung für das lineare Modell nach Gleichung (2.8) durch die Variablen aus Tabelle 2.2 gegeben.

| Koeffizient | Wert |
|---|----------|
| β_0 [MW] | 104,3528 |
| $\beta_{T_{\text{St}}}$ [MW $^{\circ}\text{C}^{-1}$] | -4,2407 |
| $\beta_{T_{\text{St}}(-d_7)}$ [MW $^{\circ}\text{C}^{-1}$] | -1,7796 |
| β_G [MW $\text{kWh}^{-1}\text{m}^2$] | -1,0053 |
| β_W [MW s m^{-1}] | 1,844 |

Tabelle 2.2.: Koeffizienten des linearen Modells.

²¹p-Wert der t-Statistik kleiner 0,001

Dabei beschreiben die Variablen $\beta_{T_{St}}$ die Abhängigkeit von der Tagesdurchschnittstemperatur, β_G die Abhängigkeit von der Tages-Globalstrahlung und β_W die Abhängigkeit von der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit. Die Variable $\beta_{T_{St}(-d_7)}$ beschreibt die Abhängigkeit von der Durchschnittstemperatur der vorangegangenen Woche²². Abbildung 2.22 zeigt den Verlauf der Wärmenachfrage im Vergleich zu realen Einspeisedaten.

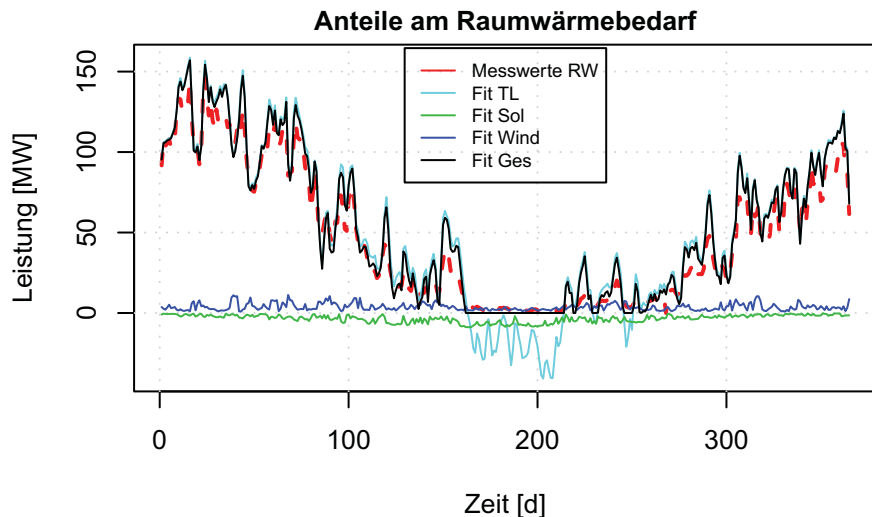


Abbildung 2.22.: Anteile der unterschiedlichen Effekte auf die Wärmenachfrage. TL:= Anteil der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste; Sol:= Solare Gewinne; Wind:= Auskühlung durch Wind; Ges:= Summe aus den einzelnen Bestandteilen.

Wie in Abbildung 2.21 zu erahnen, sind die Datensätze Tagesdurchschnittstemperatur und Globalstrahlung teilweise korreliert. Die Korrelationen der verwendeten Datensätze sind in Tabelle 2.3 gegeben.

| | P_{RW} | T_{St} | $T_{St}(-d_7)$ | P_{Glob} | v_{Wind} |
|----------------|----------|----------|----------------|------------|------------|
| P_{RW} | 1 | -0,96 | -0,94 | -0,63 | 0,12 |
| T_{St} | -0,96 | 1 | 0,92 | 0,67 | -0,09 |
| $T_{St}(-d_7)$ | -0,94 | 0,92 | 1 | 0,63 | -0,19 |
| P_{Glob} | -0,63 | 0,67 | 0,63 | 1 | -0,28 |
| v_{Wind} | 0,12 | -0,09 | -0,19 | -0,28 | 1 |

Tabelle 2.3.: Korrelation zwischen den Wetterdaten und der Raumwärmenachfrage.

In linearen Modellen ist die Bestimmung der Variablen stark korrelierter Datensätze nicht exakt möglich. Dementsprechend können sich die Anteile an der Raumwärmenachfrage, die durch die Variablen $\beta_{T_{St}}$, $\beta_{T_{St}(-d_7)}$ und β_G bestimmt sind, verschieben.

Anhand des linearen Modells kann in einfacher Näherung auf die durchschnittliche Innentemperatur T_i in den Gebäuden geschlossen werden. Abbildung 2.22 zeigt, dass sich der größte Teil der Wärmeeinspeisung in das Fernwärmenetz durch die Abhängigkeit von den Außentemperaturen ergibt. In

²²7-Tagesdurchschnitt

einfachster Näherung kann somit die Einspeisung durch

$$P_{FW} = P_0 + \beta_T \cdot \Delta T \quad (2.10)$$

beschrieben werden. Für $\Delta T = T_i - T_a$ gilt

$$P_{FW} = P_0 + \beta_T \cdot T_i - \beta_T \cdot T_a. \quad (2.11)$$

Für diesen Fall entspricht $P_0 + \beta_T \cdot T_i = \beta_0$ aus Gleichung (2.8). Somit kann die Innentemperatur in den Gebäuden durch

$$T_i = \frac{\beta_0 - P_0}{\beta_T} \quad (2.12)$$

abgeschätzt werden.

Die Einspeisung P_{Sommer} in diesen Zeiten wird als Warmwassernachfrage in den angeschlossenen Gebäuden und als Wärmeverluste der Rohrleitungen eingestuft. Die Raumwärmenachfrage $P_{\text{RW}}(t)$ in den Gebäuden ergibt sich somit aus $P_{\text{FW}}(t) - \bar{P}_{\text{Sommer}}$. Zur Abschätzung der mittleren Innentemperatur der Gebäude wird P_0 mit $\bar{P}_{\text{Sommer}} = 12,34$ MW abgeschätzt.

Beide Koeffizienten welche den Einfluss der Außentemperatur auf die Raumwärmenachfrage beziffern ergeben -6.02 MW $^{\circ}\text{C}^{-1}$. Für die Innentemperatur T_i ergeben sich dementsprechend $15,3$ $^{\circ}\text{C}$. Diese Temperatur scheint als eher niedrig. Die typische Innenraumtemperatur in Wohngebäuden liegt bei ca. 20°C .

Abbildung 2.23 zeigt den Verlauf der Residuen zweier linearer Modelle. Modell 1²³ berücksichtigt

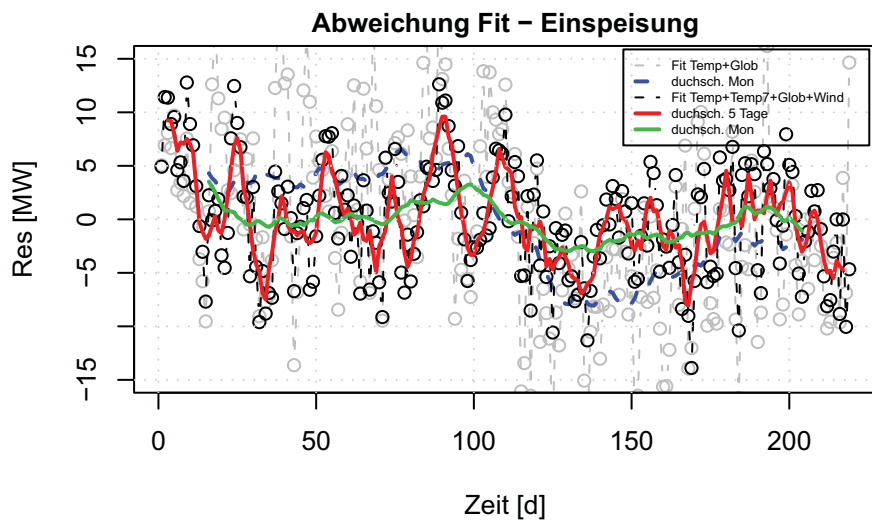


Abbildung 2.23.: Residuen eines linearen Modells mit Berücksichtigung von T und E_G (graue Punkte) und deren Monatsmittel (blau gestrichelt) bzw. eines linearen Modells das zusätzlich $T_{-7 \text{ mean}}$ und v_{Wind} berücksichtigt (schwarze Punkte) und dessen 5 Tages (rote Linie) bzw. Monatsmittel (grüne Linie) für das Jahr 2006.

ausschließlich die Parameter Außentemperatur T und Globalstrahlung E_G . Modell 2²⁴ berücksichtigt darüber hinaus die Parameter Durchschnittstemperatur der letzten 7 Tage $T_{(-7\text{ mean})}$ und Windgeschwindigkeit v_{Wind} .

Im Modell 1 liegt die Abweichung des Modells pro Tag in einem Bereich von ± 15 MW. Daneben ergibt sich für das erste Halbjahr²⁵ im Monatsmittel eine Überschätzung der Wärmenachfrage um ca. 5 MW, im Gegensatz dazu im zweiten Halbjahr²⁶ eine Unterschätzung in ähnlicher Größenordnung²⁷. Diese Abweichung wurde zwei Effekten zugeordnet. Zum Einen ist der Wärmebedarf aufgrund der thermischen Masse der Gebäude einer gewissen Trägheit unterworfen (vgl. Abschnitt 1.3), zum Anderen kann davon ausgegangen werden, dass teilweise auch die Bewohner einer gewissen Trägheit unterliegen, also mit einer zeitlichen Verzögerung auf eine Änderung der Wetterbedingungen reagieren.

Dieser Effekt kann im Modell 2 durch die Berücksichtigung der Durchschnittstemperatur der letzten 7 Tage deutlich abgemindert werden. Die täglichen Abweichungen des Modells reduzieren sich auf einen Bereich der Größenordnung ± 10 MW, die Abweichung des Monatsmittels auf ca. ± 2 MW.

Es zeigt sich, dass die Güte des statischen linearen Modells durch den Einbezug längerfristiger Temperaturmittelwerte erhöht werden kann. Somit kann die Nutzung eines dynamischen Modells durch ein wesentlich einfacher zu handhabendes lineares Modell unter (linearer) Berücksichtigung der „Vorgeschichte“ des Gebäudes und somit des Wetters umgangen werden.

²³ grau gestrichelt

²⁴ schwarz gestrichelt

²⁵ Ende des Winters und Frühling

²⁶ Herbst und Winteranfang

²⁷ siehe Abbildung 2.23 blau gestrichelte Linie

3. Abschätzung des Wärmebedarfs mit der Jahresmethode

3.1. Stadtklima

Für die Berechnung des Raumwärmebedarfs mit der Jahresmethode nach Gleichung (1.20) ist der Einfluss der Umgebungstemperatur durch die Heizgradstunden nach Gleichung (1.19) gegeben. Die Heizgradstunden ergeben sich aus einem Wetterdatensatz¹ für das Jahr 2006 [LfL (2009)] zu $G_t = 90,7 \text{ kKh}$. Im Folgenden wird der Wärmebedarf für das gesamte Jahr anhand dieser Heizgradstunden abgeschätzt.

Nach [Kuttler (2009)] werden „Urbane Räume ... weltweit durch klimatische und lufthygienische Verhältnisse geprägt, die im Wesentlichen durch die Art der Bebauungsstruktur und Oberflächenversiegelung sowie durch die Freisetzung von Abwärme und Luftverunreinigungen verursacht werden.“ Dabei führen unter anderem die dichte Bebauung zu einer Änderung des Albedo der Oberflächen und die Emission von Gasen und Staub zu einer veränderten atmosphärischen Gegenstrahlung aufgrund der Bildung einer „Dunstglocke“. Dies führt zu einer Erwärmung des Stadtklimas um bis zu 10°C ².

Für die Arbeit standen keine Daten bzw. Wetterdaten zur Verfügung, die es ermöglicht hätten die Auswirkung des Wärmeinseleffekts für Augsburg zu quantifizieren. Um dem Effekt des Stadtklimas in den Wärmemodellen dennoch Rechnung zu tragen wurde eine einfache Methode entwickelt um diese abzuschätzen. Dazu wurde der zu erwartende Wärmebedarf Q^* nach Gleichung (1.20)³ mit dem tatsächlichen Energiebezug E für alle Gebäude verglichen. Geht man davon aus, dass für alle Gebäude jede bisher getroffenen Annahmen korrekt wäre, ergäbe der Quotient

$$\eta = \frac{Q^*}{E} \quad (3.1)$$

den jeweiligen Umwandlungswirkungsgrad des Heizsystems des betrachteten Gebäudes. Es ist davon auszugehen, dass dieser Umwandlungswirkungsgrad sowohl statistischen als auch systematischen Fehlern unterworfen ist. Spielt der Effekt der städtischen Wärmeinsel im betrachteten Augsburger Modell eine Rolle, so muss sich dieser als systematischer Fehler in den Daten identifizieren und korrigieren lassen. Aus dem Korrekturfaktor sollte die Ausprägung des Wärmeinseleffekts ableitbar sein.

Im Allgemeinen sollte davon auszugehen sein, dass der mittlere Wirkungsgrad der Heizsysteme der Gebäude in einer Stadt nicht von deren geographischen Lage abhängig ist. Im Folgenden wurde betrachtet ob es eine Abhängigkeit des Wirkungsgrads η von der Lage des Gebäudes in der Stadt gibt

¹ aus dem Augsburger Umland

² ebenso [Kuttler (2009)]

³ zuzüglich des Wärmebedarfs für Warmwasser

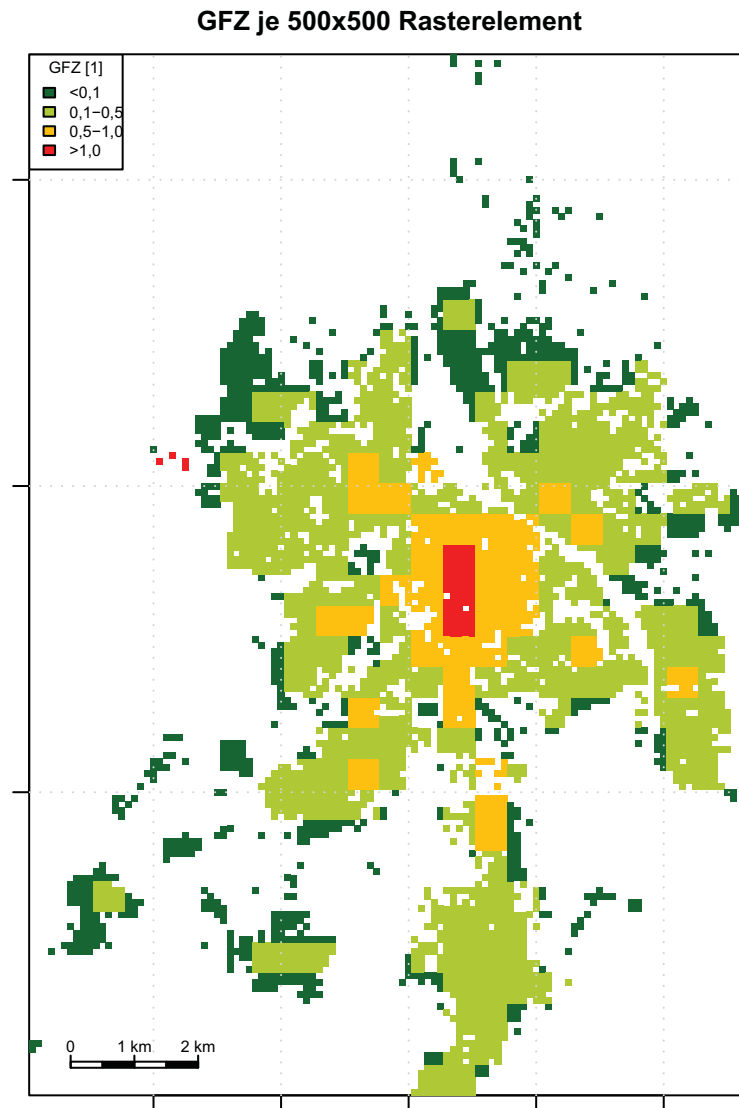


Abbildung 3.1.: Aufteilung des Stadtgebiets in Regionen unterschiedlicher Bebauungsdichte (GFZ).

und wie sich dieser Wirkungsgrad unter Berücksichtigung eines unterschiedlich stark ausgeprägten Stadtklimas verhält.

Nach [Kuttler (2009)] Tabelle 1 ist der Effekt der städtischen Wärmeinsel (UHI⁴) auf meteorologische und strukturelle Einflussfaktoren zurück zu führen. In Näherung wurde in dieser Arbeit die quantitative Auswirkung der städtischen Wärmeinsel (in Form höherer Temperaturen in Abhängigkeit der geographischen Lage in der Stadt) linear mit der Geschossflächenzahl (GFZ) im Stadtgebiet verknüpft. Die Geschossflächenzahl dient dabei als Maß für die Dichte der Bebauung. Abbildung 3.1 zeigt die Einteilung des Stadtgebiets mit einer Auflösung von 500 x 500 m großen Rasterelementen und deren jeweilige Dichte der Bebauung (GFZ).

⁴urban heat isle

Um die Auswirkung der städtischen Wärmeinsel zu quantifizieren wurden die mittleren Wirkungsgrade η für die in Abbildung 3.1 definierten Gebiete in Abhängigkeit unterschiedlich stark ausgeprägter Wärmeinseleffekte berechnet.

Abbildung 3.2 zeigt den mittleren Wirkungsgrad η in unterschiedlich dicht bebauten Gebieten für eine

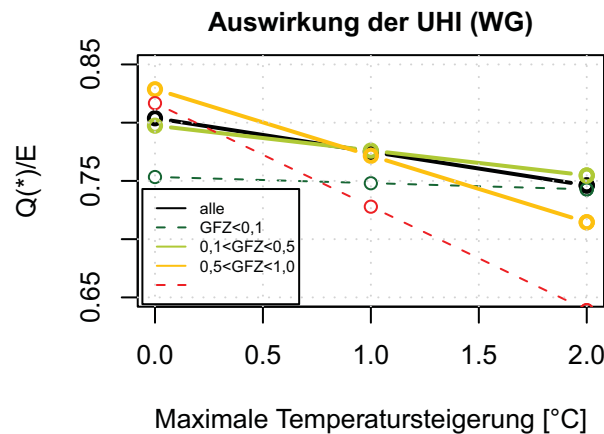


Abbildung 3.2.: Verhältnis zwischen berechnetem Wärmebedarf und Wärmebezug 2006 für Wohngebäude in den Bereichen unterschiedlicher Bebauungsdichte (GFZ) (vgl. Abbildung 3.1).

maximale durchschnittliche Temperaturerhöhung durch den Wärmeinseleffekt in der Stadtmitte um 0°C, 1°C und 2°C. Besonderes Augenmerk wurde auf die beiden größten Gebiete mit $0,1 < GFZ < 0,5$ bzw. $0,5 < GFZ < 1$ gelegt. Für eine maximale durchschnittliche Temperaturerhöhung im Stadtkern von ca. 1°C ergibt sich ein gleich großer mittlerer Wirkungsgrad für beide Gebiete (siehe Abbildung 3.2). Im Folgenden wurde der Effekt der städtischen Wärmeinsel mit einer mittleren Temperaturerhöhung von 1°C im Stadtkern berücksichtigt. Für jede 500 x 500 m-Rasterzelle wurde dementsprechend die spezifische Temperaturerhöhung linear zur GFZ der Zelle bestimmt.

Für die Berechnung der Auswirkungen des Stadtklimas und für die spätere Berechnung der Auswirkung des Klimawandels wurde die Abhängigkeit der Heizgradstunden nach Gleichung (1.19) von einer Änderung der durchschnittlichen Außentemperatur ermittelt. Es ergibt sich ein nicht linearer Zusammenhang zwischen einer zeitlich konstanten Temperaturänderung ΔT_{UHI} und den Heizgradstunden G_t . Bis zu einer Änderung der Jahresdurchschnittstemperatur um $\pm 4^\circ\text{C}$ kann das Verhalten linear genähert werden. Dabei beträgt die Abhängigkeit von der Temperaturänderung $-7,59 \text{ kWh K}^{-1}$.

3.2. Wärmebedarf

Anhand der physikalischen Eigenschaften der Gebäude nach Kapitel 1 und der beschriebenen Rahmenbedingungen kann der Raumwärmebedarf jedes Gebäudes mittels eines Hüllflächenverfahrens abgeschätzt werden. In Abbildung 2.1 ist ein Beispiel einer solche Hülle dargestellt. Zur Berechnung des Raumwärmebedarfs wurden die Transmissionswärmeverluste

3. Abschätzung des Wärmebedarfs mit der Jahresmethode

$$Q_T = \sum_{i_{Luft}} H_{T,i_{Luft}} \cdot f_{red} \cdot G_t + \sum_{i_{Boden}} H_{T,i_{Boden}} \cdot f_{red} \cdot (T_{innen} - T_{Boden}) \cdot f_{Boden} \quad (3.2)$$

mit

| | |
|-------------|--|
| Q_T | Transmissionswärmeverlust, |
| i | Bauteil i gegen Luft, bzw. gegen das Erdreich, |
| H_T | spezifischer Transmissionswärmeverlust des Bauteils, |
| f_{red} | Reduktionsfaktor aufgrund der Gebäudegröße und des Gebäudestandards nach [Loga (2001)], |
| T_{innen} | soll Innentemperatur (20°C), |
| T_{Boden} | mittlere Bodentemperatur (10°C), |
| f_{Boden} | Reduktionsfaktor bezüglich Wärmeleitfähigkeit des Bodens (0,5) |
| G_t | Heizgradstunden |

bestimmt. f_{Boden} wird dabei mit 0,5 angenommen. Für jedes Gebäude wird dazu, wie in Kapitel 2.7 beschrieben, aus der Höhe, der Grundfläche, der Dachform und der Länge der Kontaktfläche zu etwaigen Nachbargebäuden die thermisch aktive vertikale Mantelfläche des Gebäudes abgeschätzt. Diese wird, entsprechend dem Verhältnis zwischen Fenster- und Wandfläche des zugewiesenen IWU-Typgebäudes in Fenster- und Wandfläche unterteilt. Die Dachfläche wird anhand der Grundfläche der Gebäude und dem Verhältnis Dachfläche zu Grundfläche des jeweiligen IWU-Typgebäudes abgeschätzt. Den unteren Abschluss der thermischen Hülle bildet die Grundfläche der Gebäude. Typische U -Werte für die Bauteile der thermischen Hülle wurden durch die Typgebäude nach [IWU (2003)] zugeordnet.

Die Lüftungswärmeverluste ergeben sich aus

$$Q_L = c_{Luft} \cdot V_{Luft} \cdot n \cdot f_{red} \cdot G_t \quad (3.3)$$

mit

| | |
|------------|--|
| Q_L | Lüftungswärmeverluste, |
| c_{Luft} | spezifische Wärmekapazität der Luft, |
| V_{Luft} | Luftvolumen im Gebäude und |
| n | Luftwechselrate (0,6 h ⁻¹ bzw. 0,5 h ⁻¹) ⁵ . |

In Anlehnung an [EnEV (2007)] werden anhand der durchschnittlichen Ausrichtung von Fensterflächen der IWU-Gebäudedatenbank die spezifischen solaren Gewinne q_{sG} pro gesamter vertikaler Mantelfläche der Augsburger Gebäude abgeschätzt. Anhand dieser Größe können die solaren Gewinne Q_{sG} der Gebäude mit

$$Q_{sG} = q_{sG} \cdot A_{vert} \quad (3.4)$$

mit

| | |
|------------|---|
| Q_{sG} | solare Gewinne, |
| q_{sG} | spezifische solare Gewinne pro vertikale Gebäudehülle und |
| A_{vert} | vertikale Gebäudehülle |

⁵Die Luftwechselrate aufgrund von Fugenlüftung ist bei neueren Fenstern deutlich reduziert. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Lüftungsrate in Gebäuden mit einem U -Wert der Fenster kleiner als 2 W/(m²K) von 0,6 h⁻¹ auf 0,5 h⁻¹ verringert (vergl. [Loga (2001)])

abgeschätzt werden.

Im Weiteren werden die Werte für den Warmwasserbedarf bestimmt. Hierfür gibt es zwei Ansätze; $Q_{WW} = 850 \text{ kWh Pers a}^{-1}$ (aus [Reiter u. a. (2009)]) bzw. $Q_{WW} = 12,5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ [EnEV (2007)]. Im Allgemeinen haben Wohngebäude einen höheren Warmwasserbedarf als nicht Wohngebäude. Um dem Rechnung zu tragen wurde der Warmwasserbedarf für alle Gebäude je zur Hälfte aus beiden Werten nach

$$Q_{WW} = 1/2 \cdot 850 \text{ kWh Pers a}^{-1} \cdot Anz_{Bew} + 1/2 \cdot 12,5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1} \cdot A_{GF} \quad (3.5)$$

mit

Anz_{Bew} Anzahl Personen pro Gebäude und
 A_{GF} Geschossfläche pro Gebäude

abgeschätzt.

Die für die Bereitstellung des warmen Wassers nötige Kesselleistung für Wohngebäude kann anhand der Anzahl der Wohneinheiten abgeschätzt werden. Der Zapfwärmebedarf Q_Z einer Normwohnung ist nach [DIN 4708 (1994)] $5,82 \text{ kWh}$. Die Zapfdauer⁶ t_Z wird als 2 h angenommen. Die nötige Kesselleistung ergibt sich aus

$$P_{WW} = \sqrt{Anz_{WE}} \cdot Anz_{Bew_WW} \cdot \frac{Q_Z}{t_Z} \quad (3.6)$$

mit

Anz_{Bew_WW} Norm-Anzahl Personen pro Wohneinheit und
 Anz_{WE} Anzahl Wohneinheiten.

$\sqrt{Anz_{WE}}$ berücksichtigt dabei die Gleichzeitigkeit der Zapfungen in Abhängigkeit der Anzahl der Wohneinheiten.

Interne Gewinne werden nach [EnEV (2007)] mit $Q_i = 22 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ für alle Gebäude veranschlagt.

Die Summe aller Verlust- und Gewinnmechanismen ergibt für den Raumwärmebedarf Q_{RW}^* für jedes Augsburger Gebäude.

$$Q_{RW}^* = Q_T + Q_L - Q_{sG} - Q_i \quad (3.7)$$

Der gesamte Wärmebedarf summiert sich aus Raumwärme- und Warmwasserbedarf.

$$Q^* = Q_{RW}^* + Q_{WW} \quad (3.8)$$

3.3. Abgleich mit Endenergiebezugsdaten

Durch den Abgleich mit tatsächlichen Energiebezugsdaten⁷ können die berechneten Wärmebedarfe verifiziert werden. Dazu werden im Folgenden ausschließlich Wohngebäude betrachtet. Diese erfüllen

⁶Zeitdauer zwischen zwei Zapfungen; hier zwischen 2 Norm-Vollbädern.

⁷Endenergiebezug für Fernwärme und Gas aller Gebäude im Versorgungsgebiet der Stadtwerke Augsburg für das Jahr 2006. Es wird davon ausgegangen, dass jedes versorgte Gebäude nicht mit zusätzlichen Energieträgern (z.B. Holzheizung) versorgt wird.

3. Abschätzung des Wärmebedarfs mit der Jahresmethode

im Allgemeinen die gewählten Parameter der Wärmebedarfsberechnung wie z.B. Innentemperatur, Warmwasserbedarf, interne Gewinne etc..

Die Abbildungen 3.3 zeigen die Verteilungen der anhand der Gebäudedatenbank abgeschätzten netto-

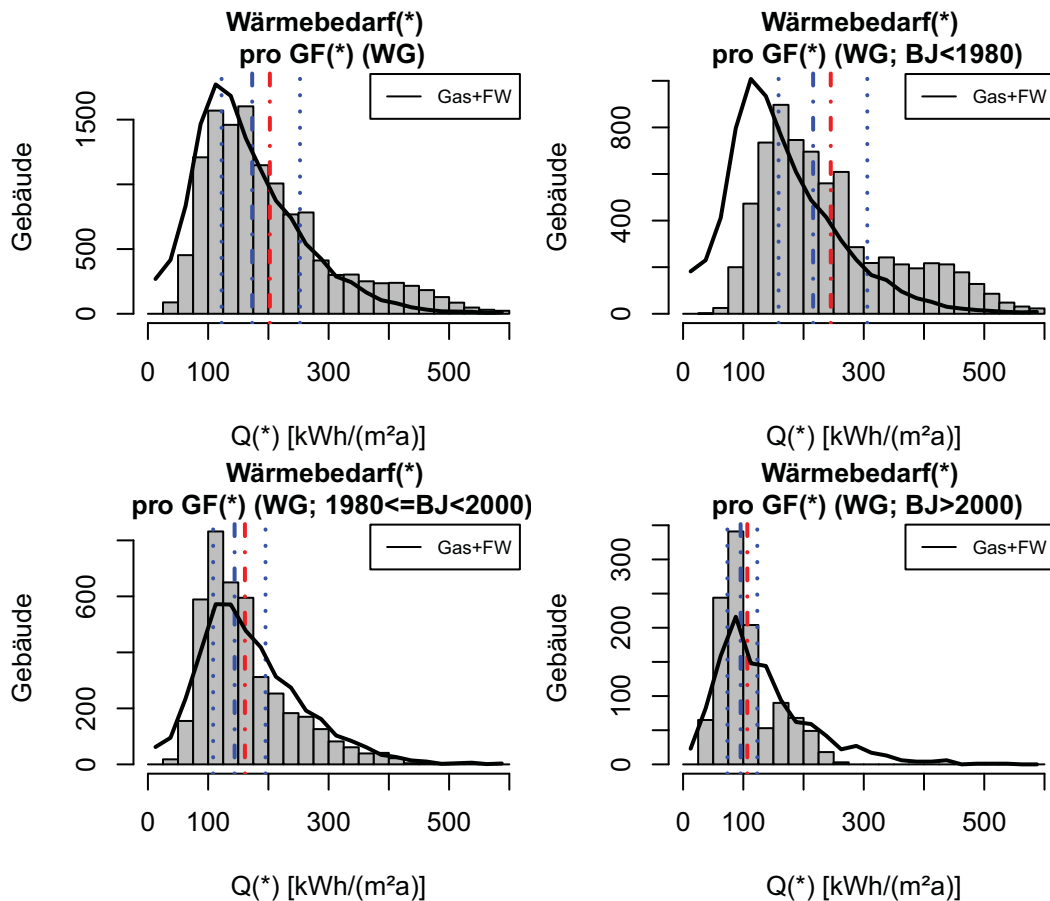


Abbildung 3.3.: Verteilung des spezifischen Wärmebedarfs pro Quadratmeter und Jahr der Wohngebäude anhand der Berechnung mittels Gebäudedatenbank (Balken) und die entsprechende Verteilung des spezifischen Wärmebedarfs 2006 ($E \cdot \eta_{\text{Heizung}}$ mit $\eta_{\text{Heizung}} = 0,8$) (Linie). Oben links: Alle Baualter oben rechts: Baujahr vor 1980; unten links: Baujahr zwischen 1980 und 2000; unten rechts: Baujahr nach 2000.

Wärmenachfragen pro Quadratmeter Bezugsfläche⁸ und die Verteilung des Gas- bzw. Fernwärmebezugs dieser Gebäude.

Die Verteilungen des tatsächlichen Wärmebedarfs 2006⁹ und des berechneten Wärmebedarfs Q^* der Augsburger Gebäude zeigen eine gute Übereinstimmung (Abbildung 3.3 links oben). Bei den Gebäuden mit Baualter jünger als 2000 (Abbildung 3.3 rechts unten) ist erkennbar, dass sich die abgeschätzte spezifische Wärmenachfrage stark um den Bereich zwischen ca. 80 und 120 kWh m⁻² a⁻¹

⁸Der Wärmebedarf wird auf die brutto Geschossfläche bezogen. Diese ergibt sich aus der brutto Grundfläche und der Anzahl der Vollgeschosse.

⁹Der Wirkungsgrad aller Heizanlagen wird mit $\eta = 0,8$ angenommen. Der Wärmebedarf Q ergibt sich dementsprechend aus dem Endenergiebezug (Gas, Fernwärme) E zu $Q = E \cdot \eta$.

konzentriert¹⁰. Die Verteilung des Gas bzw. Fernwärmebezugs zeigt dagegen eine wesentlich breitere Verteilung bis zu wesentlich höheren spezifischen Wärmenachfragen. Dies lässt auf eine mögliche Diskrepanz zwischen angenommenen und tatsächlichen Eigenschaften der thermischen Hülle der Gebäude schließen. Ein weiterer Ansatzpunkt könnte die Auswirkung des Rebound-Effekts darstellen (vgl. beispielsweise [Sorrell (2007)]). Beim Rebound-Effekt werden die Einsparpotentiale durch technische Verbesserungen dadurch reduziert, dass sich der (Stellen-) Wert des jeweiligen Guts beim Nutzer verringert. Dadurch wird u.U. zum Einen unachtsamer mit dem Gut, hier Wärme, umgegangen, zum Anderen ergeben sich u.U. höhere Ansprüche der Nutzer, hier höhere Innentemperaturen.

Für ältere Gebäude (Abbildung 3.3 rechts oben) ergeben sich zum Teil höhere berechnete spezifische Wärmebedarfe als beobachtet. Es wird angenommen, dass dies aus der Tatsache resultiert, dass keine Information über etwaige Sanierungen für die Augsburger Gebäudedatenbank zur Verfügung stehen. Sämtlichen Gebäuden wird der, für den Typ und das Baualter typische physikalische Gebäudeaufbau nach [IWU (2003)] zugewiesen. Es sind keine Sanierungsmaßnahmen berücksichtigt. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass besonders bei älteren Gebäuden bereits Sanierungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Beispielsweise eine nachträgliche Dämmung des Daches oder der Tausch der ursprünglichen Fenster. Dies führt zu einer Überschätzung des ermittelten Wärmebedarfs. Ebenso kann ein „negativer“ Rebound-Effekt eine Rolle spielen. Durch den hohen (finanziellen) Aufwand der betrieben werden muss um schlecht gedämmte Gebäude zu beheizen, ist davon auszugehen, dass dort niedrigere Raumtemperaturen herrschen. Dies würde sich ebenso in einer Überschätzung des berechneten Wärmebedarfs bei den angenommenen 20°C Raumtemperatur auszeichnen.

Zur Korrektur der Abweichung zwischen berechneten Wärmebedarfen nach [IWU (2003)] und den tatsächlichen Verbräuchen wurden die Attribute der Gebäudehülle mit Baujahr vor 1980 nach folgenden Kriterien angepasst (siehe Tabelle 3.1).

| Bauteil | saniert wenn U-Wert > als [W/(m ² K)] | auf U-Wert [W/(m ² K)] |
|-------------|--|--------------------------------------|
| Fenster | 2,6 | 1,6 |
| Dach | 1,0 | 0,4 |
| Kellerdecke | 1,5 | 1,0 |

Tabelle 3.1.: Korrektur der U-Werte der thermischen Hülle von älteren Gebäuden.

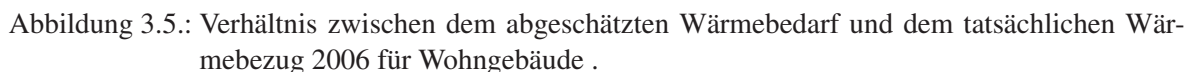
Abbildung 3.4 zeigt die Verteilungen der berechneten und tatsächlichen Nachfragen nach der Korrektur der Eigenschaften der thermischen Hülle wie in Tabelle 3.1 beschrieben.

Für reine Wohngebäude ergibt sich im Mittel ein Verhältnis zwischen dem gesamten abgeschätzten Wärmebedarf und dem gesamten tatsächlichen Wärmebezug¹¹ von 0,83¹². Dabei variiert das Verhältnis für die unterschiedlichen IWU-Gebäudetypen (siehe Abbildung 3.5). Im Mittel werden die Wärmebedarfe von älteren Gebäuden eher über-, die von neueren Gebäuden eher unterschätzt. Der

¹⁰Die Gebäude bei denen kein Baualter vorlag und die mit dem Baujahr 2000 abgeschätzt wurden sind in dieser Betrachtung nicht enthalten.

¹¹für Gebäude mit Fernwärme und/oder Gasbezug 2006

¹²vergleiche Abschnitt 3.1 bzw. Gleichung (3.1)



Betrachtet man dieses Verhältnis nur für mit Fernwärme versorgte Wohngebäude¹⁴ ergibt sich mit 0,60 eine weitaus größere Abweichung. Der tatsächliche Bedarf 2006 dieser Gebäude war im Schnitt deutlich höher als der berechnete. Dies kann nicht nur bedingt durch den Wirkungsgrad der Fernwärmeübergabestationen erklärt werden. Abbildung 3.6 zeigt die geografische Verteilung der Abweichung.

¹⁴ 180 Gebäude

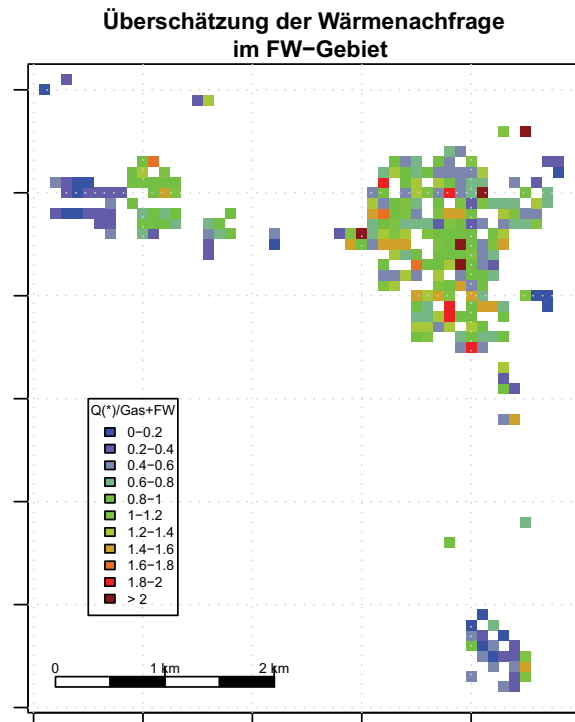


Abbildung 3.6.: Verhältnis zwischen dem abgeschätzten Wärmebedarf und dem tatsächlichen Fernwärmebezug 2006 für fernwärmeversorgte Wohngebäude. In blauen Bereichen wird die tatsächliche Wärmenachfrage unter-, in roten überschätzt.

Es zeigt sich, dass vor allem fernwärmeversorgte Wohngebäude die eher in den Randbezirken des Stadtgebiets liegen 2006 eine deutlich höhere Fernwärmenachfrage hatten, als sie nach der Abschätzung mit Hilfe der Kennwerte der IWU-Datenbank haben sollten. Dies kann mehrere Gründe haben. Ein Grund könnte sein, dass die Gebäude einen deutlich schlechteren wärmetechnischen Standard aufweisen als nach IWU zu erwarten¹⁵.

Im Rahmen dieser Arbeit standen Daten zur Verfügung, die eine Einteilung der Gebäude in Nutzungen ermöglichen. Allerdings war es aufgrund des hohen Aggregationsgrades der Daten nicht möglich statistische Daten über den Wärmebedarf einzelner gewerblicher Nutzungsarten zu generieren. Im Folgenden wird im Rahmen dieser Arbeit vereinfachend davon ausgegangen, dass der Wärmebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme und die Versorgung mit Warmwasser mit gleichen Parametern für die Misch- und nicht-Wohngebäude übernommen werden können. Es ergeben sich die Wärmebedarfe wie in Abbildung 3.7 und 3.8 zu sehen.

Das Verhältnis zwischen berechnetem Energiebedarf und Endenergiebezug ist für die Gebäude MG und nWG mit 0,68 deutlich geringer als bei den Wohngebäuden (Abbildung 3.8). Es ist nicht davon auszugehen, dass die Heizsysteme für diese Gebäude einen schlechteren Wirkungsgrad aufweisen als die für Wohngebäude. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass im Mittel der tatsächliche Endenergiebedarf dieser Gebäude geringer ist als mit dem verwendeten Algorithmus zur Bedarfsermittlung abgeschätzt wird. Das mittlere Verhältnis zwischen berechnetem Wärmebedarf und tatsäch-

¹⁵Diese Annahme kann nach Rücksprache mit den Stadtwerken als sehr Wahrscheinlich angenommen werden.

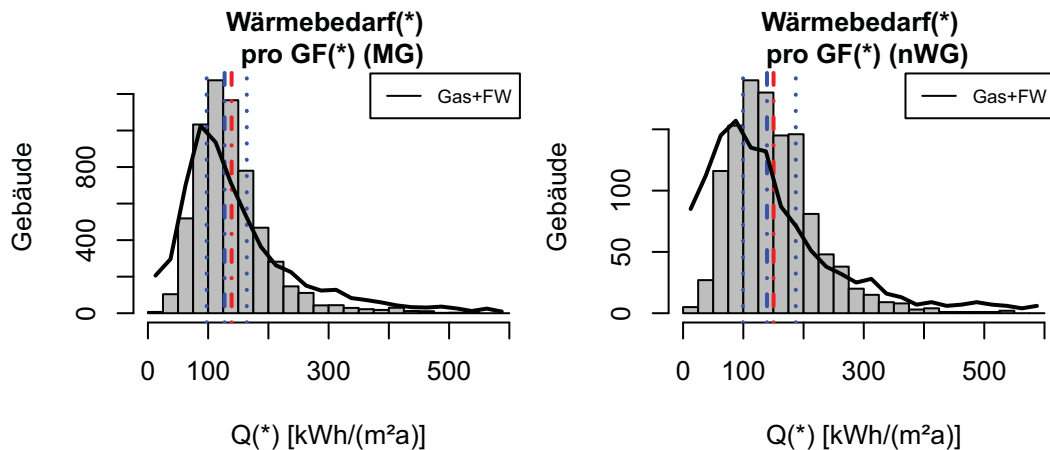


Abbildung 3.7.: Berechneter Wärmebedarf und tatsächlicher Wärmebezug 2006 für alle Stadtwerke-Versorgte Misch- und nicht-Wohngebäude Gebäude.

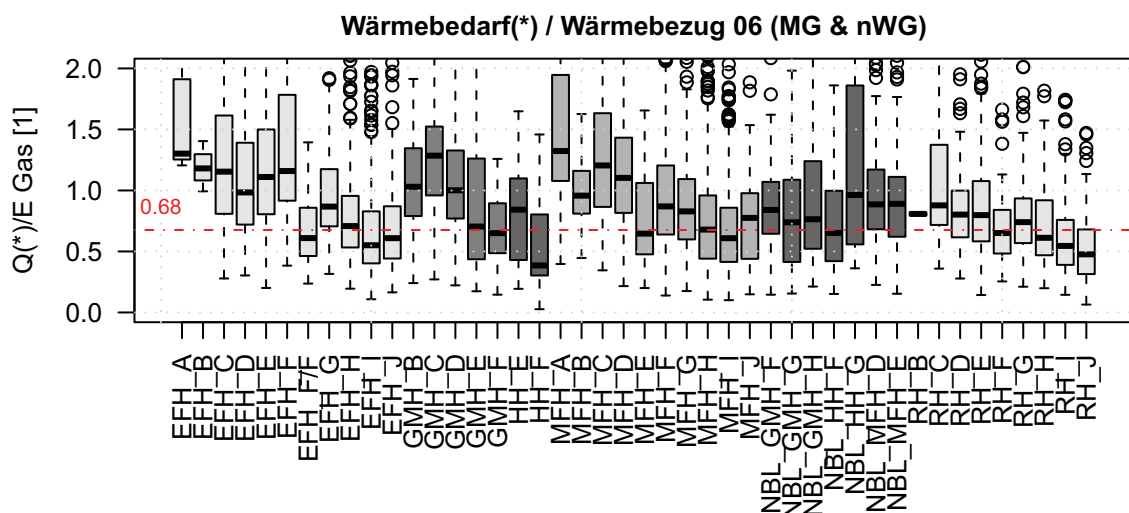


Abbildung 3.8.: Verhältnis zwischen dem abgeschätzten Wärmebedarf und dem tatsächlichen Wärmebezug 2006 für alle Stadtwerke-Versorgte Misch- und nicht-Wohngebäude mit einem Wärmebezug von 20 bis $800 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$.

lichem Wärmebezug für alle Augsburger Gebäude¹⁶ liegt bei 0,79.

3.4. Räumliche Verteilung der Wärmenachfrage

Abbildung 3.9 zeigt die räumliche Verteilung der berechneten Wärmenachfrage für das Augsburger Stadtgebiet. Wie zu erwarten ist der Wärmebedarf im Stadtkern deutlich höher als in den Randbezirken. Dies resultiert aus der dichten Bebauung und den eher schlechteren Wärmestandards aufgrund

¹⁶WG, MG & nWG

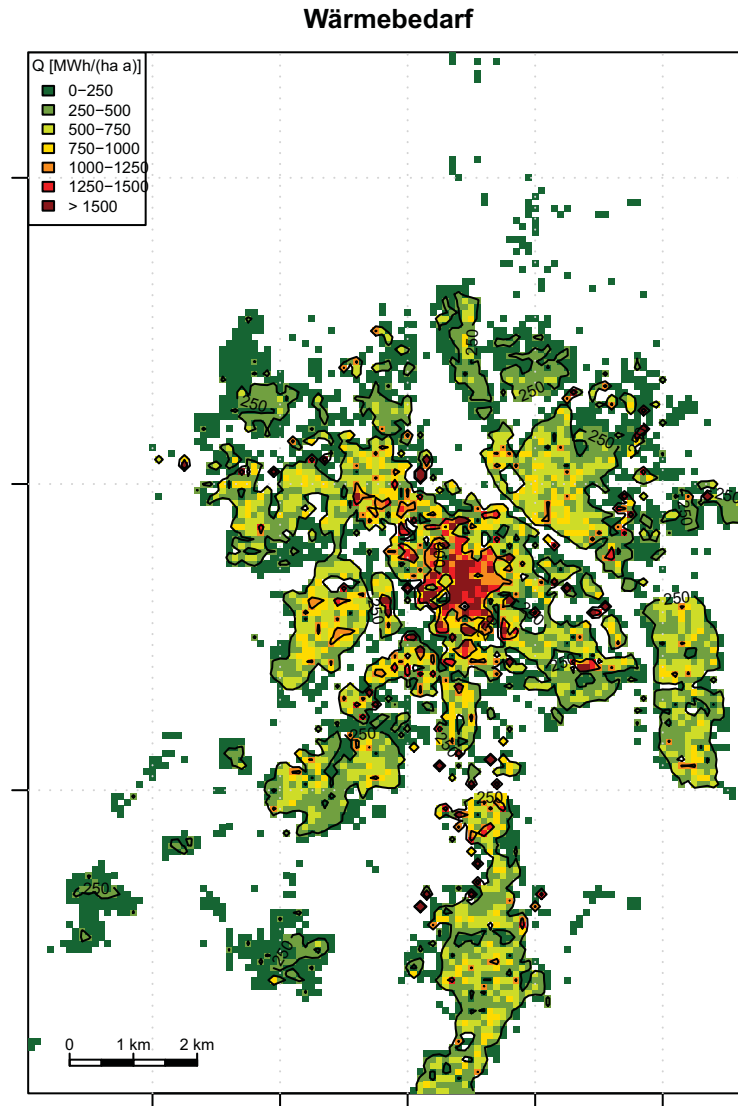


Abbildung 3.9.: Räumliche Verteilung des berechneten Wärmebedarfs für das gesamte Augsburger Stadtgebiet. Dargestellt ist der Wärmebedarf in MWh/(ha a) für jedes bebaute Rasterelement.

des höheren Baualters im Stadtkern. Mit abnehmender Bebauungsdichte ist, wie zu erwarten auch eine Abnahme des Wärmebedarfs zu beobachten.

Zur weiteren Verifikation der Qualität des Ansatzes wurden die berechneten Wärmebedarfe geografisch mit den realen Bezügen verglichen. Dazu wurde aus dem berechneten Wärmebedarf anhand des mittleren Wirkungsgrads von Heizanlagen der Endenergiebedarf berechnet und für jedes Rasterelement $RZ_{i,j}$ das Verhältnis

$$\chi_{i,j} = \frac{Q_{i,j}^*}{(E_{Gas_{i,j}} + E_{FW_{i,j}}) \cdot \eta_H} \quad (3.9)$$

mit

3. Abschätzung des Wärmebedarfs mit der Jahresmethode

| | |
|---|---|
| $\chi_{i,j}$ | Verhältnis je Rasterzelle, |
| $Q_{i,j}^*$ | berechneter Wärmebedarf je Rasterzelle ($\sum_{\text{Geb}}^{RZ_{i,j}} Q_{\text{Geb}}^*$), |
| $E_{\text{Gas}_{i,j}}$ bzw. $E_{\text{FW}_{i,j}}$ | Gas bzw. Fernwärmebezug je Rasterzelle und |
| η_H | mittlerer Wirkungsgrad der Heizsysteme (0,79) |

bestimmt.

Für das Verhältnis $\chi_{i,j} = 1$ stimmen berechneter und tatsächlicher Endenergiebedarf 2006 überein. In Abbildung 3.10 wird die geografische Verteilung der „Güte“ der Berechnung gezeigt. Grüne Bereiche

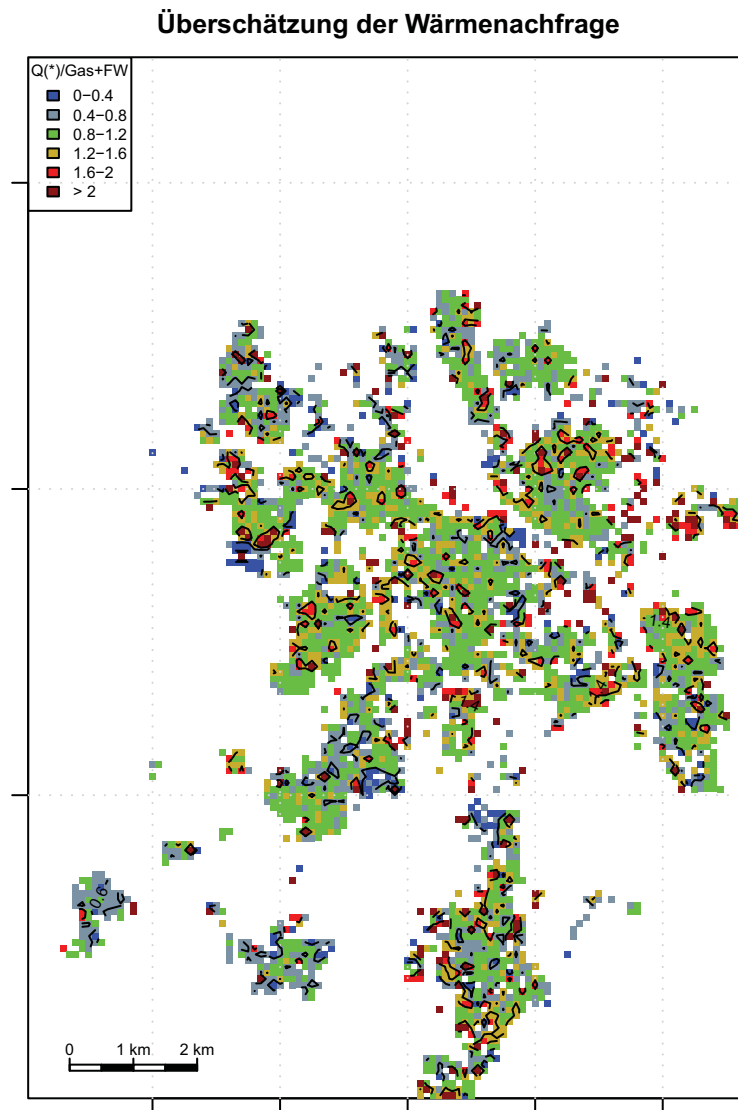


Abbildung 3.10.: Relative Abweichung von berechneter Wärmenachfrage zu Wärmebezug 2006.

zeigen dabei Rasterelemente, für die das Verhältnis χ in einem Bereich von 0,8 bis 1,2 liegt und die somit eine gute Übereinstimmung aufweisen. In blauen Bereichen wird der tatsächliche Wärmebedarf 2006 durch die Berechnung unterschätzt, in roten überschätzt.

Abbildung 3.11 zeigt die Verteilung von χ auf die Rasterelemente. Für die Hälfte aller Rasterelemente

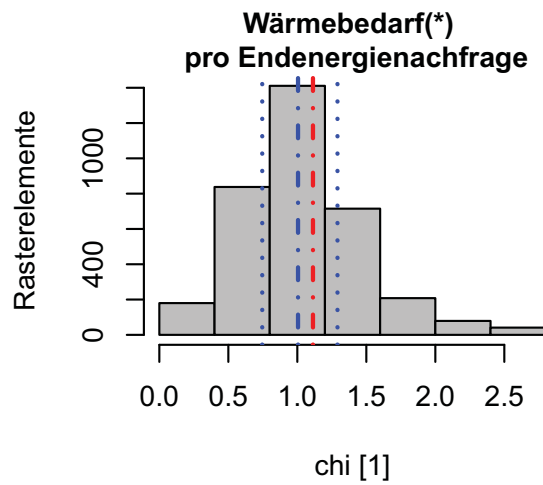


Abbildung 3.11.: Verteilung des Verhältnisses χ auf die Rasterelemente.

liegt χ in einem Bereich von 0,75 bis 1,29¹⁷.

¹⁷erstes bzw. drittes Quartil

4. Abschätzung des Wärmebedarfs auf Stundenbasis

Für die spätere Optimierung der Augsburger Energieversorgung ist es notwendig den zeitlichen Verlauf der Wärmenachfrage für unterschiedliche Bereiche der Stadt zu bestimmen. Dazu wird der Verlauf des Raumwärmebedarfs nach Gleichung (1.17) und (1.18) auf Stundenbasis ermittelt. Der Wärmebedarf zur Bereitstellung von warmem Wasser für ein gesamtes Jahr wird nach Gleichung (3.5) berechnet. Zur Berechnung der Wärmelast aufgrund der Warmwasserbereitung wird diese Energiemenge gleichmäßig auf alle Stunden im Jahr verteilt¹.

Um die so erhaltenen Wärmelasten zu verifizieren wurde die Wärmebedarfslast für alle an das Augsburger Fernwärmenetz angeschlossenen Gebäude berechnet und mit der tatsächlichen Einspeisung in das Netz verglichen.

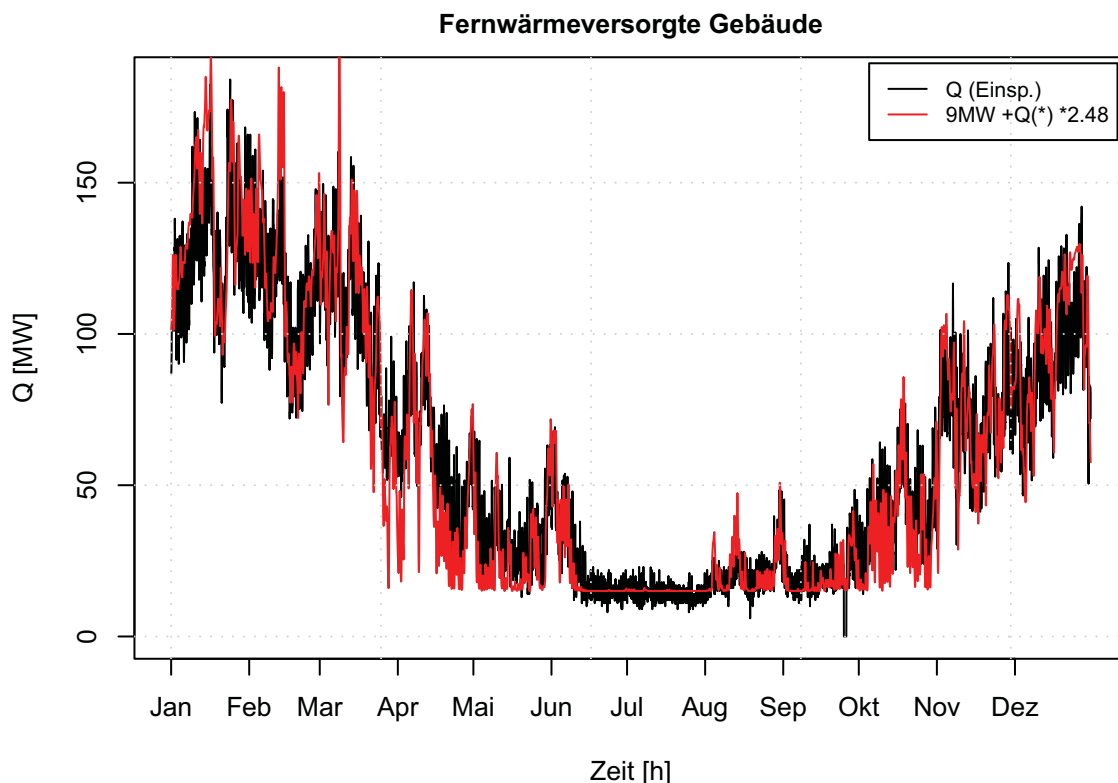


Abbildung 4.1.: Berechnete skalierte Wärmebedarfslast (rot) und Wärmeeinspeisung (schwarz) für das Augsburger Fernwärmenetz 2006.

¹dementsprechend wird davon ausgegangen, dass ein Pufferspeicher für Warmwasser Nachfragespitzen ausgleicht.

4. Abschätzung des Wärmebedarfs auf Stundenbasis

Um beide Lasten vergleichen zu können müssen sämtliche Verluste zwischen der Einspeisung von Wärme in das Fernwärmenetz und dem Wärme- bzw. Warmwasserbedarf in den Gebäuden berücksichtigt werden. Thermische Verluste in einem Wärmenetz sind stark von der Temperatur des Wärmeträgers abhängig. Um eine ausreichende Versorgung garantieren zu können, müssen Wärmenetze, unabhängig von der übertragenen Leistung, bei einer Mindesttemperatur gehalten werden². Dies führt zu konstanten, von der Transportleistung unabhängigen thermischen Verlusten. Im Folgenden wird die sommerliche Differenz aus Einspeisung in das Fernwärmenetz und dem berechneten sommerlichen Wärmebedarf als konstanter thermischer Verlust der Fernwärmeleitungen angesehen und mit 9 MW abgeschätzt³. Die verbleibende Wärmelast ist dementsprechend die vom Wetter abhängige Komponente. Wie im Abschnitt 3.3 beschrieben, wird durch das Modell die Fernwärmenachfrage der fernwärmeversorgten Wohngebäude deutlich unterschätzt. Bei gewerblich bzw. industriell genutzten Gebäuden kommt es zum Teil zu einer noch stärkeren Unterschätzung der Wärmenachfrage. Durch eine Analyse von Einzeldaten konnte ein Großteil der Abweichungen zwischen tatsächlichem und berechnetem Wärmebedarf einzelner Gebäude identifiziert werden. Diese Abweichungen kommen durch die automatisierte Kategorisierung der Gebäude in (beheizte) Haupt- und (ungeheizte) Nebengebäude⁴ zustande. Dadurch wurden zum Teil fälschlicher Weise größere, industriell genutzte Fertigungshallen als Nebengebäude ohne Wärmebedarf eingestuft.

Um dem Rechnung zu tragen, wurde die gesamte Wärmenachfrage auf die gesamte Wärmeeinspeisung ohne die konstanten Verluste normiert⁵ und in Abbildung 4.1 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Verlauf des so ermittelten Wärmebedarfs gut mit der Einspeisung in das Fernwärmenetz übereinstimmt.

Im Folgenden soll beispielhaft für zwei Gebäude die Auswirkung einer Gebäudesanierung auf die Wärmelast aufgrund der Berechnung auf Stundenbasis gezeigt werden.

Abbildungen 4.2 und 4.3 zeigen die Lasten, Tabelle 4.1⁶ die daraus resultierenden Eigenschaften der Wärmeversorgung für beide Gebäude. Dabei ergibt sich die nötige Kapazität des Wärmeerzeugers P_H aus der Bedingung $\max(P_{WW}, \Phi_{HL})$ aus den Gleichungen (3.6) bzw. (1.13). Es zeigt sich, dass für Gebäude mit hohem wärmetechnischen Standard die nötige Kapazität des Wärmeerzeugers durch die Leistungsnachfrage der Warmwasserbereitung bestimmt ist. Dementsprechend reduziert sich die Auslastung des Wärmeerzeugers deutlich. Ebenso sinkt die Anzahl der Heiztage deutlich mit besserem Wärmestandard.

In bisherigen Arbeiten⁷ wurde der zeitliche Verlauf während eines Jahres der Wärmenachfrage von Gebäuden bzw. Gebäudeclustern anhand gegebener Lastkurven abgeschätzt. Mit Hilfe der beschriebenen Vorgehensweise zur Abschätzung der stundengenauen Wärmelast können diese Lastkurven nun

²in Augsburg mindestens 80°C

³Wärmeverluste in Fernwärmeleitungen können (z.B. nach [BRU (2001)] Seite FHK 3.203 vom 01.03.01) mit ca. 35 W/m bei Innenrohrtemperatur von 80°C und mit ca. 25 W/m bei 60°C abgeschätzt werden. Die Fernwärmetrassenlänge in Augsburg beträgt 2009 ca. 110 km. Dementsprechend ergibt sich für Hin- und Rückleitung (35 kW/km + 25 kW/km)*110 km = 6,6 MW Leitungsverluste + Verluste der weiteren Bauteile (Ventile, Abzweige, Fernwärmeübergabestationen, Verteilung in den Gebäuden ...)

⁴i.A. Garagen, Schuppen, Lagerhallen

⁵Normierungsfaktor 2,48

⁶mit: P_H Leistung des Heizsystems; Q' spezifischer Wärmebedarf pro Jahr; VLH Volllaststunden; Ant. WW Anteil der Warmwassernachfrage an der gesamten Wärmenachfrage.

⁷z.B. [Winkelmüller (2006)]

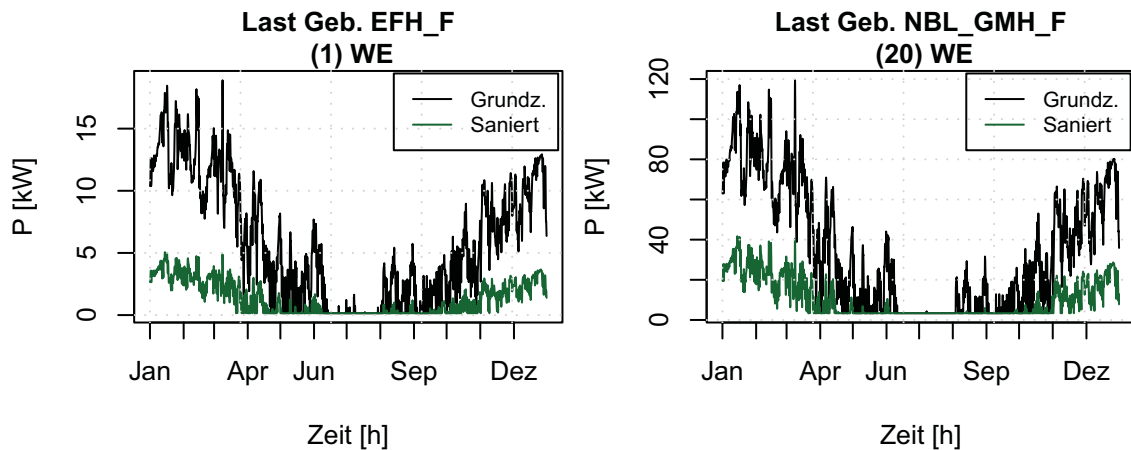


Abbildung 4.2.: Berechnete Wärmebedarfslast für ein Einfamilienhaus (links) und ein Mehrfamilienhaus (rechts, 20 Wohneinheiten) je im unsaniertem Zustand (schwarze Linie) und nach der Sanierung von Fenstern, Dach, Kellerdecke und Wänden (keine aktive Lüftung) (grüne Linie).

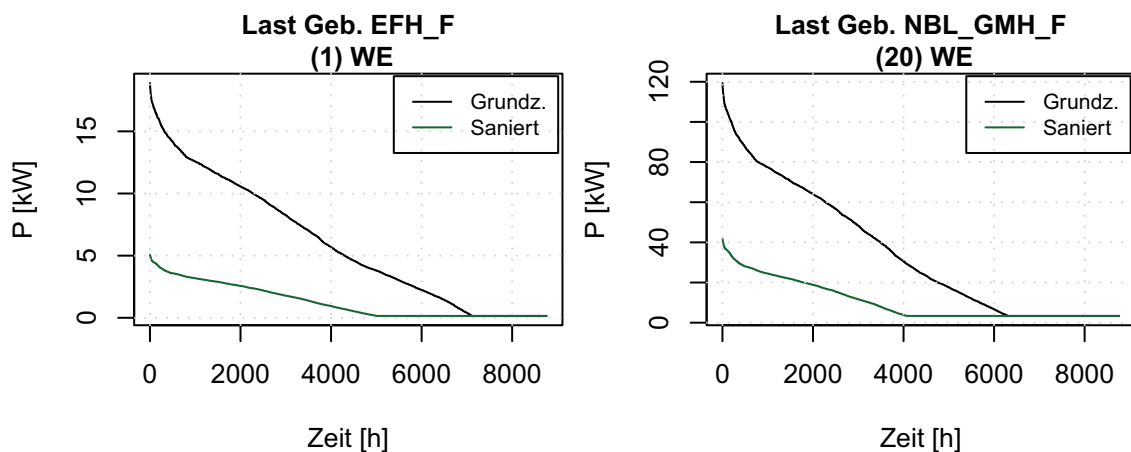


Abbildung 4.3.: Berechnete geordnete Wärmebedarfslast für ein Einfamilienhaus (links) und ein Mehrfamilienhaus (rechts) je im unsaniertem Zustand (schwarze Linie) und nach der Sanierung von Fenster, Dach, Kellerdecke und Wänden (keine aktive Lüftung) (grüne Linie).

für jedes Gebäude berechnet werden. Dementsprechend finden, neben der Reduktion des Jahreswärmebedarfs auch die in Tabelle 4.1 gezeigten veränderten Rahmenbedingungen für die Energieversorgung Einzug in die im Kapitel II betrachteten Energiemodelle.

4. Abschätzung des Wärmebedarfs auf Stundenbasis

| Sanierung | P_H [kW] | Q' [kWh/(m ² a)] | VLH [h/a] | Heiz Tage [d] | Ant. WW [%] |
|-------------------|---------------|----------------------------------|--------------|------------------|----------------|
| EFH_F (1 WE) | | | | | |
| Grundzustand | 25,7 | 688 | 2017 | 296 | 2,5 |
| San. Fenster | 24,1 | 604 | 1887 | 287 | 2,9 |
| +Boden | 22,2 | 547 | 1857 | 283 | 3,2 |
| +Dach | 18,5 | 440 | 1786 | 273 | 4,0 |
| +Wand | 11,6 | 149 | 967 | 209 | 11,7 |
| +akt. Lüftung | 11,6 | 76 | 491 | 169 | 23,1 |
| NBL_GMH_F (20 WE) | | | | | |
| Grundzustand | 171,8 | 136,9 | 1757 | 263 | 9,8 |
| San. Fenster. | 158,3 | 111,9 | 1557 | 243 | 12,0 |
| +Boden | 139,8 | 94,4 | 1488 | 229 | 14,2 |
| +Dach | 121,9 | 78,0 | 1412 | 215 | 17,1 |
| +Wand | 78,4 | 41,0 | 1154 | 169 | 32,6 |
| +akt. Lüftung | 78,4 | 16,9 | 475 | 83 | 79,2 |

Tabelle 4.1.: Eigenschaften der Gebäude in Abhängigkeit von Sanierungsvarianten (jeweils zuzüglich der weiteren Sanierung).

5. Abschätzung der Entwicklung des Wärmebedarfs mit der Jahresmethode

Im folgenden Abschnitt werden die Auswirkungen von energetischen Sanierungen und des Klimawandels auf den Wärmebedarf der Augsburger Bestandsgebäude für den Zeitraum bis 2050 abgeschätzt.

Wie bereits beschrieben steigen nach [Grad (2008)] die Winterlichen Temperaturen bis 2050 im Schnitt um $2,1^{\circ}\text{C}$. Um dieser Temperaturänderung Rechnung zu tragen, wurden für die Berechnung der Entwicklung des Wärmebedarfs die Außentemperaturen linear um $0,042^{\circ}\text{C}$ pro Jahr erhöht¹. Dies führt zu einer jährlichen Verringerung der Heizgradstunden um $0,32 \text{ kWh a}^{-1}$ ².

Bezüglich der Auswirkungen von energetischen Sanierungen auf den Wärmebedarf der Augsburger Bestandsgebäude wurden verschiedene Szenarien betrachtet. Es werden mittlere Sanierungsraten³ von Gebäuden zwischen 0% und 3% gewählt. In den letzten Jahren betrug die Sanierungsrate in Deutschland in etwa 1%. Bei einer Sanierungsrate von einem Prozent werden dementsprechend zwischen 2010 und 2050 40% des Gebäudebestandes energetisch saniert. Bei 2% Sanierungsrate werden 80% der Gebäude saniert. Bei 3% Sanierungsrate werden innerhalb von 34 Jahren alle Gebäude saniert. Bis zum Jahr 2050 werden in diesem Fall 20% der Gebäude ein zweites Mal saniert. Die Sanierungsvarianten sind in Tabelle 5.1 zusammen gefasst.

| Sanierungs- rate [%] | U Wand [kWh/(m ² a)] | U Dach [kWh/(m ² a)] | U Boden [kWh/(m ² a)] | U Fenster [kWh/(m ² a)] | Luftwechsel- rate [1/h] |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| 0 (Klima) | - | - | - | - | - |
| 0,5 | 0,24 | 0,24 | 0,30 | 1,3 | 0,5 |
| 1,0 | 0,24 | 0,24 | 0,30 | 1,3 | bis 2020 0,5 ab 2020 0,12 |
| 2,0 | 0,24 | 0,24 | 0,30 | 1,3 | 0,12 |
| 3,0 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,6 | 0,12 |

Tabelle 5.1.: Zielwerte energetischer Sanierungsmaßnahmen für das Jahr 2010.

Dabei wurden für das Jahr 2010 für die einzuhaltenden Wärmedurchgangskoeffizienten U jeweils die zugelassenen Höchstwerte der jeweiligen Bauteile aus [EnEV (2009)] angesetzt. Im Weiteren wurde für die Entwicklung der Wärmedurchgangskoeffizienten U eine Verschärfung der zulässigen Höchstwerte und somit eine Verringerung dieser Werte um je 1% pro Jahr bezogen auf das Vorjahr angenommen.

¹ $2,1^{\circ}\text{C}$ für die Zeitperiode von 2000 bis 2050

² ca. 0,35% pro Jahr; vgl. Abschnitt 3.1

³ Anteil der Gebäude am Gesamtbestand der in einem Jahr saniert wird

5. Abschätzung der Entwicklung des Wärmebedarfs mit der Jahresmethode

Es wird davon ausgegangen, dass durch die Sanierung von Gebäuden die Luftwechselrate nach [Loga (2001)] um 0,1 1/h auf 0,5 1/h verringert werden kann. Bei den Szenarien San=2% und San=3% wird für alle Sanierungen auch eine aktive Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung berücksichtigt, bei Szenario San=1% erst für Sanierungen nach dem Jahr 2020. Der Gesamtwirkungsgrad der Reduktion der Lüftungswärmeverluste dieser Maßnahme wird mit 80% abgeschätzt. Demzufolge ergibt sich die thermisch relevante Luftwechselrate zu 0,12 1/h.

Saniert wird jeweils eine durch die Sanierungsrate festgelegte Anzahl an Gebäuden. Dabei werden im Modell jeweils die Gebäude mit den höchsten auf die Mantelfläche bezogenen spezifischen Transmissionswärmeverluste H_T saniert.

Abbildung 5.1 und Tabelle 5.2 zeigen die Auswirkungen sowohl des Klimawandels⁴ als auch der zusätzlichen Sanierungsmaßnahmen.

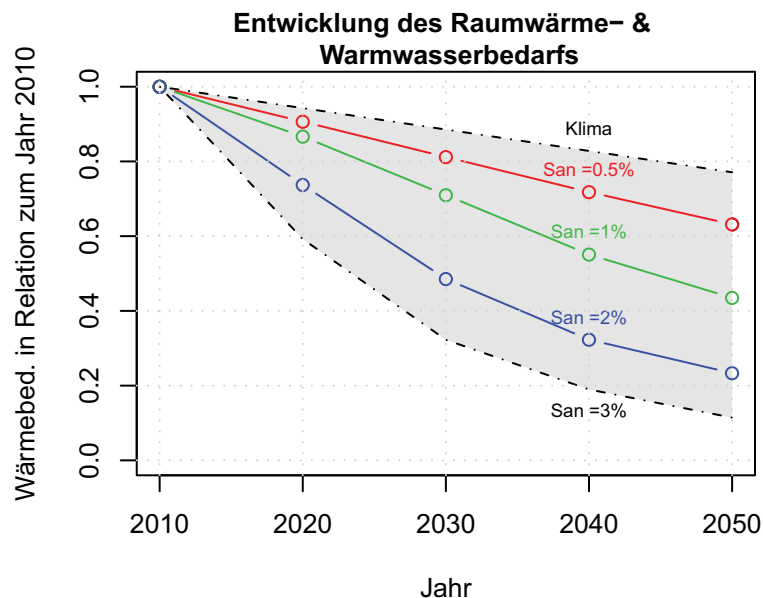


Abbildung 5.1.: Änderung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs für die Augsburger Bestandsgebäude.

| | Klima | San=0,5% | San=1% | San=2% | San=3% |
|------|-------|----------|--------|--------|--------|
| 2020 | 6 | 9 | 13 | 26 | 41 |
| 2030 | 11 | 19 | 29 | 51 | 68 |
| 2040 | 17 | 28 | 45 | 68 | 81 |
| 2050 | 23 | 37 | 56 | 77 | 89 |

Tabelle 5.2.: Prozentualer Rückgang der Wärmenachfrage für Raumwärme und Warmwasser bezüglich 2010.

Aufgrund dieser Annahmen ergibt sich eine Reduktion des Wärmebedarfs der Augsburger Bestandsgebäude für die Bereitstellung von Raumwärme und warmem Wasser von 2010 bis 2050 von mindes-

⁴vergl. San=0% = Klima

tens 23% für das Szenario ohne energetische Sanierungen und bis zu 89% für das Szenario San=3%.

Typische Sanierungsraten für Deutschland lagen in der Vergangenheit im Größenordnungsbereich von 1%⁵. Bei dieser Rate liegt die Reduktion der Wärmenachfrage konstant bei ca. 1,4% pro Jahr. Bis zum Jahr 2050 verringert sich die Wärmenachfrage in Augsburg in diesem Szenario um 56%.

Die Abbildung 5.2 zeigt die Verteilung der Wärmenachfrage im Jahr 2050 und deren Reduktion bezo-

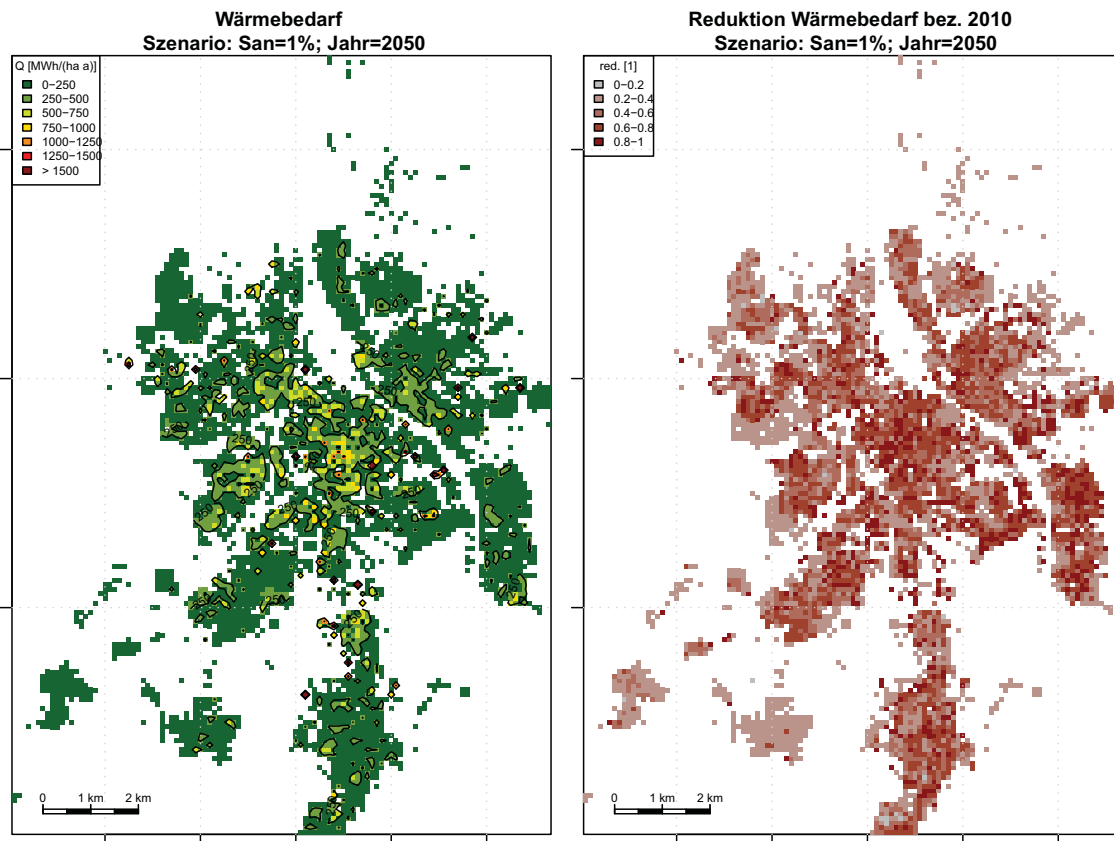


Abbildung 5.2.: Raumwärme- und Wärmebedarf für Warmwasserbedarf 2050 bzw. deren Änderung im Vergleich zum Jahr 2010 für die Augsburger Bestandsgebäude. Sanierungsrate 1% p.a.

gen auf das Jahr 2010 für das Szenario San=1%⁶. Der Rückgang des Wärmebedarfs verteilt sich nicht gleichmäßig über das Stadtgebiet. Im Stadtkern ist, nach dem gewählten Entscheidungsmodell für Sanierungen⁷, der stärkste Rückgang der Wärmenachfrage zu verzeichnen. Es zeigt sich eine deutliche Vergleichmäßigung der Wärmenachfrage über das Stadtgebiet.

Anhand der Wärmenachfrage je Flächenelement können mit Hilfe einfacher Annahmen die spezifischen Kapitalkosten für die Wärmeverteilung pro Wärmenachfrage abgeschätzt werden. Zur Abschätzung wurden folgende Annahmen getroffen.

⁵siehe Anhang Abschnitt 12.1.7

⁶Im Anhang 12.1.8 sind weitere Wärmekarten gezeigt.

⁷saniert wurden je die Gebäude mit den schlechtesten thermischen Eigenschaften.

5. Abschätzung der Entwicklung des Wärmebedarfs mit der Jahresmethode

- Jede Rasterzelle⁸ kann mit einem Verteilnetz der Länge 200 m erschlossen werden.
- Die spezifischen Installationskosten für das Fernwärmenetz werden im Stadtgebiet mit 800 Euro m^{-1} angenommen⁹.
- Die Anschlussquote¹⁰ wurde mit 80% angenommen.

In Abbildung 5.3 sind die spezifischen Leitungskosten einer Fernwärmeversorgung der jeweiligen

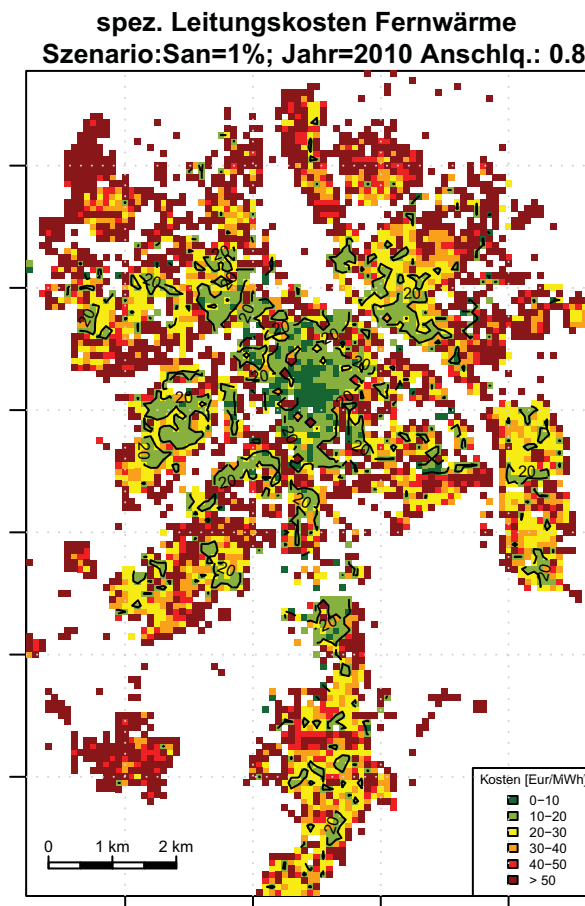


Abbildung 5.3.: Leitungskosten der Fernwärmeversorgung bei einer Anschlussrate von 80% für das Szenario San=1%.

Rasterzelle unter obigen Annahmen für das Jahr 2010 dargestellt. Es zeigt sich, dass in Bereichen der Stadt Fernwärme mit spezifischen Kapitalkosten für das Verteilnetzsystem von unter 20 Euro/kWh angeboten werden kann. Unter heutigen Rahmenbedingungen sollte in diesen Gebieten eine kosten-deckende Vermarktung von Fernwärme realisierbar sein.

Bei einer Sanierungsrate von 1% pro Jahr reduziert sich der Wärmeenergiebedarf der Stadt bis 2050 um 56% (siehe Tabelle 5.2 bzw. Abbildung 5.1). Verteilen sich die Gebäudesanierungen gleichmäßig

⁸ 100 x 100 m

⁹ 5,5% Verzinsung, 35 Jahre Lebensdauer => 6,5% Annuität => 10 400 Euro/(ha a)

¹⁰ Anteil des Energiebedarfs innerhalb einer Rasterzelle der durch Fernwärme versorgt wird.

auf das gesamte Stadtgebiet¹¹ steigen die spezifischen Kapitalkosten des Wärmenetzes flächendeckend deutlich an. Die daraus resultierenden spezifischen Verteilkosten sind in den Abbildungen 5.4 gezeigt. Im Augsburger Stadtgebiet bleibt selbst im Stadtzentrum nur ein vernachlässigbar kleines

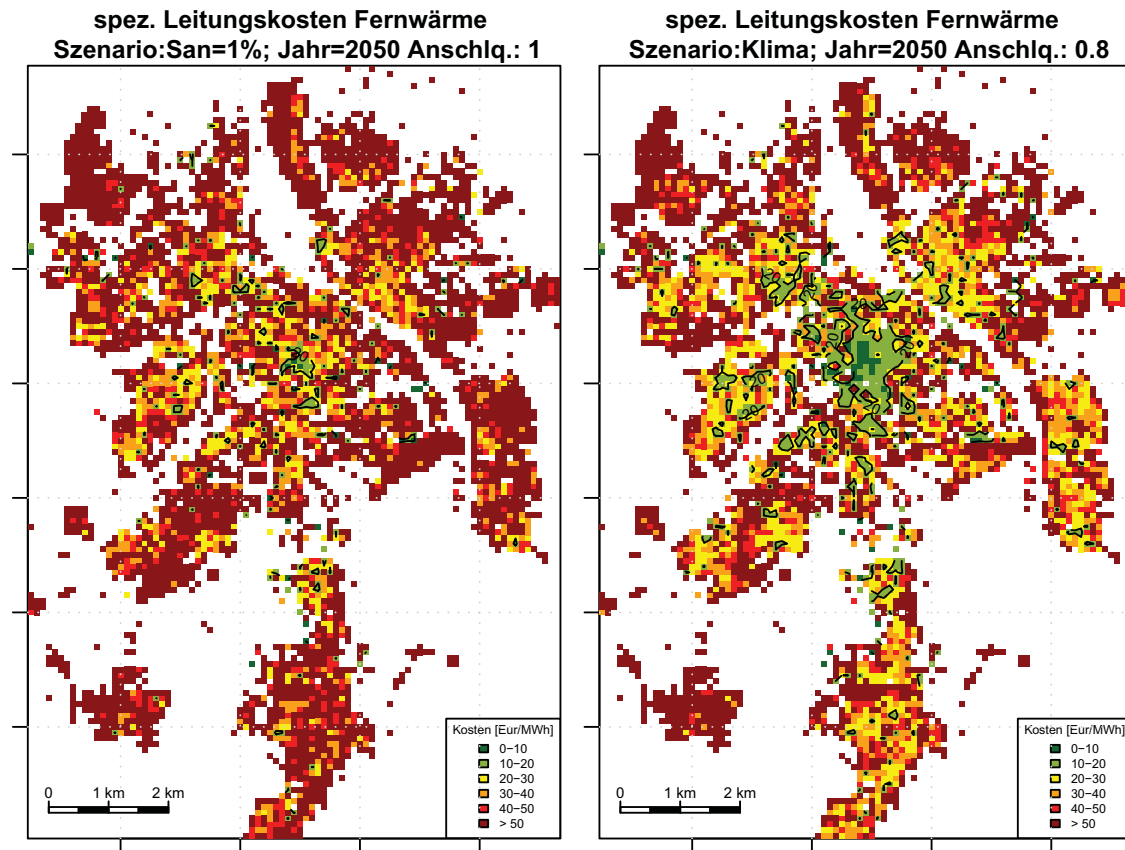


Abbildung 5.4.: Spezifische Leitungskosten für das Jahr 2050 bei Anschlussraten von 100% und Sanierungsrate von 1% (links) bzw. Anschlussraten von 80% und Sanierungsrate von 0% (Klima) (rechts).

Areal mit spezifischen Kapitalkosten des Wärmenetzes von unter 20 Euro/kWh (siehe Abbildung 5.4 links). Im Szenario Klima¹² bleibt im Stadtkern ein weitläufiges Gebiet mit vertretbaren Kapitalkosten der Fernwärmeversorgung erhalten (siehe Abbildung 5.4 rechts).

¹¹Im Modell je die Gebäude mit geringstem Dämmstandard

¹²spricht ohne Sanierungen von Gebäuden

6. Resümee

Für die Berechnung des Wärmebedarfs mittels einer bottom-up Methode auf Grundlage von gebäudescharfen Daten, wie sie hier angewandt wurde, sind eine Reihe an Gebäudedaten nötig. In Augsburg lagen an unterschiedlichen Stellen eine Vielzahl an gebäudescharfen Datensätzen vor. Es zeigte sich, dass vielfach diese Datensätze nicht vollständig sind bzw. nur einen Teil der Augsburger Gebäude abbilden. Demgegenüber sind die Daten teilweise redundant. Anhand typischer Zusammenhänge zwischen den redundanten Daten (z.B. Gebäudehöhe und Anzahl Vollgeschosse) können fehlende Daten zum Teil abgeschätzt werden. Das größte Nichtwissen herrscht im Bereich des Aufbaus der Gebäude und somit in deren thermischen Eigenschaften. Dies wurde durch die Zuweisung von typischen Aufbauten kompensiert.

Aufgrund der so generierten Daten konnte der Wärmebedarf für jedes Augsburger Gebäude berechnet werden. Durch den Vergleich von berechnetem und tatsächlichem Wärmebedarf konnte die Methode mit einer für diese Arbeit ausreichenden Genauigkeit verifiziert werden.

Der Vorteil der sich aus dieser Herangehensweise ergibt ist, dass der Wärmebedarf für alle Gebäude in Abhängigkeit unterschiedlicher Rahmenbedingungen bestimmt werden kann. So ist sowohl die geographische Verteilung der Wärmenachfrage als auch deren Entwicklung berechenbar. Durch den Wärmeetlas ist es somit möglich, verschiedene Lösungsansätze für den Umgang mit dem Klima- und „Energiewandel“ durchzuspielen und zu bewerten.

In den betrachteten Szenarien konnte gezeigt werden, wie sich unterschiedliche Raten der energetischen Sanierung auf die Wärmenachfrage Augsburgs und deren Verteilung auswirken. Im Weiteren konnte geografisch aufgelöst quantifiziert werden welchen Einfluss diese Reduktion der Wärmenachfrage auf die Ökonomie der Versorgung von Wärmenachfragen via Fernwärmenetz hat.

Teil II.

**Optimierung von
Referenzenergiesystemen**

7. der Modellgenerator *newURBS*

Teil I beschreibt die räumliche Verteilung und die zu erwartenden Veränderungen der Wärmenachfrage im Augsburger Stadtgebiet. Der beschriebene, teilweise deutliche Rückgang der Wärmenachfrage hat eine Reihe von Auswirkungen auf das gesamte Energiegefüge eines städtischen Energiesystems. Beispielsweise verhalten sich Wärmeverluste und Kosten für den Bau und den Betrieb von Fernwärmeleitungen nicht proportional zur transportierten Wärmemenge sondern viel mehr proportional zur Trassenlänge. Bei sinkendem Durchsatz können somit für eine Rekapitalisierung der Investition die anfallenden fixen Kapitalkosten für das Leitungssystem nur auf eine geringere Energiemenge verteilt werden. Dies führt zu ansteigenden spezifischen Transportkosten¹.

Neben der Menge der nachgefragten Wärmeenergie ändert sich auch deren zeitlicher Verlauf. Die Zahl der Tage mit Raumwärmebedarf sinkt und der Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung gewinnt deutlich an Gewicht. Insbesondere vor dem Hintergrund geforderter steigender Anteile an KWK-Strom hat dies Auswirkungen auf die Effizienz, die Wirtschaftlichkeit und das Potential von Verteil- und Erzeugungstechnologien sowohl im Wärme- als auch im Stromsektor. Sowohl die Entwicklung der Wärmenachfrage als auch deren Verlauf wird für die folgenden Modellszenarien anhand der Sauerungsraten nach Tabelle 5.1 auf Stundenbasis (nach Teil I Kapitel 4) bestimmt.

Ebenso wie die Wärmenachfrage ist die Nachfrage nach Strom möglicherweise schwerwiegenden Veränderungen unterworfen. Hier können Effizienzsteigerungen, wie beispielsweise bei Beleuchtung, Kühlschränken oder beim Stand-by Verhalten von elektronischen Geräten eine Rolle spielen. Dem gegenüber ist es durchaus denkbar, dass in naher Zukunft immer mehr Technologien in großem Maßstab auf die Nutzung von elektrischer Energie zurückgreifen. Als Beispiele können hier die Gebäudeklimatisierung, die Gebäudeheizung (mit Wärmepumpen) aber auch die verstärkte Nutzung elektrischer Energie im Zuge einer Elektrifizierung des Verkehrssektors aufgeführt werden. Ebenso kann die Einführung von neuen Messtechnologien im Stromsektor eine starke zeitliche Kopplung zwischen Stromnachfrage und Strompreis bewirken. In diesen Fall sind neue Tarifsysteine und daraus resultierende veränderte Nutzergewohnheiten mit einhergehenden veränderten Lastgängen zu erwarten. Es gibt erste Bemühungen bezüglich „smart grid“ und „smart-metering“ Technologien. So ist durch das EnWG (2005) geregelt, dass von Energieversorgungsunternehmen ab dem 31. Dezember 2010 für Letztverbraucher von Elektrizität ein lastvariabler oder tageszeitabhängiger Tarif anzubieten ist.

Bei der Erzeugung von Strom ist es wahrscheinlich, dass es durch den Ausbau von Windkraft und Photovoltaik trotz Zubau von adäquaten Netzen- und Speicherkapazitäten aufgrund marktwirtschaftlicher Gesetzmäßigkeiten zu stärkeren Fluktuationen der Strompreise kommt. Daneben ist ungewiss, wie sich der Kraftwerksmix der Großkraftwerke² in Deutschland entwickeln wird.

Eine der Möglichkeiten Emissionen an CO₂ einzusparen, ist die kombinierte Produktion an Wärme und Strom (KWK). Jedoch ist das Minderungspotential von KWK-Anlagen unter Anderem entscheidend davon abhängig, welche Primärenergien ersetzt werden. Abbildung 7.1 zeigt das Potential einer

¹ Kosten pro transportierter Energiemenge z.B. Cent pro kWh.

² heute vorwiegend Kohle- und Kernkraftanlagen

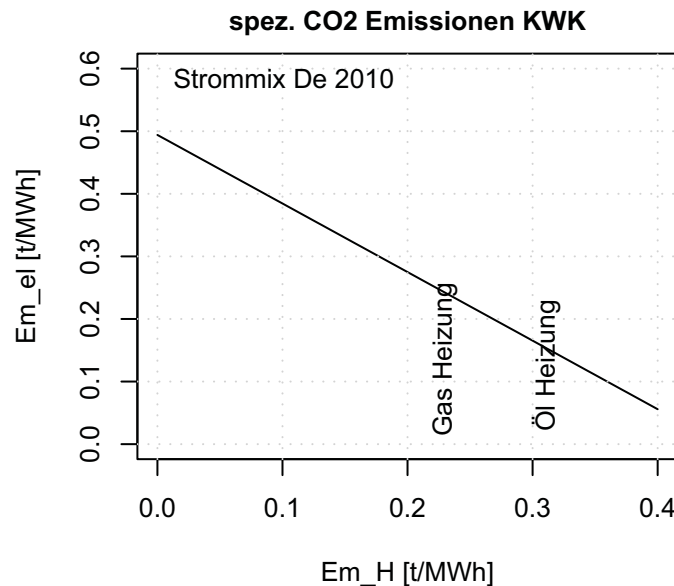


Abbildung 7.1.: Potential zur Minderung von CO₂-Emissionen durch den Einsatz von gekoppelter Produktion von Wärme und Strom in Abhängigkeit der spezifischen Emissionen der ersetzten Endenergien. Die Abszisse gibt die spezifischen CO₂-Emissionen der zu ersetzenden Wärme, die Ordinate die des zu ersetzenden Stromes wieder.

erdgasbetriebenen KWK-Anlage mit 40% elektrischem und 44% thermischem Wirkungsgrad³. Für eine Kombination der durch den KWK-Prozess vermiedenen Endenergieträgern, deren spezifische Emissionen oberhalb der Grenzlinie (Diagonale in Abbildung 7.1) liegen, reduziert der Einsatz der KWK-Anlage die Gesamtemissionen⁴. Für Kombinationen unterhalb der Grenzlinie erhöhen sich im gezeigten Beispiel die spezifischen Emissionen⁵. Dementsprechend hat KWK aus fossilen Primärenergieträgern nur in bestimmten Bereichen ein Reduktionspotential bezüglich der Emissionen von CO₂. Auf einem Weg in eine CO₂ freie Energieversorgung kann die fossil betriebene Kraftwärmekopplung nur als Brückentechnologie gesehen werden.

Im Folgenden sollen anhand linearer bzw. gemischt ganzzahliger Optimierung unterschiedlicher Szenarien die Auswirkungen der beschriebenen veränderten Rahmenbedingungen aufgezeigt werden. Die Optimierung minimiert dabei die volkswirtschaftlichen Kosten^{6,7} des Problems. Die bei der Deckung der Nachfragen entstehende CO₂-Emission kann begrenzt werden.

Grundlegende Fragestellungen an die Modelle sind, in wie weit Reduktionsziele für CO₂-Emissionen

³in den thermischen Wirkungsgrad wurden 10% Wärmeverluste aufgrund der Wärmeverteilung bereits berücksichtigt.

⁴Bei der Vermeidung des Bezugs von Strom des heutigen deutschen Strommixes kann unabhängig von der vermiedenen Wärmetechnologie CO₂ eingespart werden.

⁵Wird beispielsweise Wärme aus einer Gasheizung vermieden können die Gesamtemissionen nicht verringert werden, wenn die spezifischen Emissionen des vermiedenen Strombezugs geringer als 250 g/kWh sind.

⁶Gesamtheit aller Kosten die innerhalb der Modellgrenzen anfallen. Kosten die außerhalb der Modellgrenzen entstehen werden über Kosten für den Import von Gütern berücksichtigt.

⁷Ebenso ist eine Minimierung der CO₂-Emissionen oder eine Mischung aus beiden Optionen möglich.

erreicht werden können, welche Technologien dafür eingesetzt werden müssen und mit welchen volkswirtschaftlichen Vermeidungskosten zu rechnen ist.

Für die Optimierung wird auf den Modell-Generator *newURBS* zurückgegriffen. Dieser findet bereits in den Arbeiten Heitmann (2005), Herrmann (2006) und weiteren Anwendung und wird dort beschrieben. *newURBS* basiert auf den in der Arbeit Richter (2004) eingeführten Strukturen.

In *newURBS* sind die Prozessklassen *Process (pros)*, *Store (store)* und *Transport (trans)* definiert. Für diese Arbeit wurde der Modellgenerator überarbeitet und um eine Reihe an Optionen erweitert. Eine Maßnahme war die Erweiterung von *newURBS* um die Prozessklasse der Verteilungsprozesse *dis (distribution process)*. Diese Prozessklasse hat grundsätzlich die gleichen Eigenschaften wie die Prozessklasse *pros*. Allerdings skalieren Kapazitäten, Verluste und Kosten der Verteilungsprozesse linear mit der Größe *A* der Region (*sit*) in welcher der jeweilige Prozess verortet ist. Im Rahmen der Szenarien dieser Arbeit wird die Größe *A* der Region als die Fläche der Region in Hektar definiert. Dies muss nicht zwangsläufig der Fall sein. *newURBS* zeichnet sich dadurch aus, dass sämtliche Flüsse von Gütern nicht auf fixe Einheiten festgelegt sind. Dieses Konzept wurde bei der Implementierung der Eigenschaften der Regionen übernommen. Für die Größe *A* der Region ist es beispielsweise möglich die Leitungslänge als Größe der Region zu definieren die nötig ist, um die Region vollständig mittels Gas- bzw. Fernwärmeleitungen zu versorgen.

Die Kapazität für Verteilungsprozesse ist durch Gleichung (7.1) bestimmt.

$$P_{out}(sit, dis, coin, coout, t) < C_{out}(sit, dis, coin, coout) \cdot A(sit) \quad (7.1)$$

mit

P_{out} Gesamtleistung, die den Verteilungsprozess verlässt hier [MW],
 C_{out} Kapazität pro Fläche hier [MW/ha],
 A Fläche der Region hier [ha]

für die Menge über die möglichen Elemente

t Zeitschritte,
 sit Regionen,
 dis Verteilungsprozesse,
 $coin$ & $coout$ verwendete bzw. produzierte Güter.

Die jährlichen Kapitalkosten ergeben sich aus

$$K_{Inv}(dis) = C_{new}(dis) \cdot k_{Inv}(dis) \cdot A(sit(dis)) \quad (7.2)$$

mit

K_{Inv} jährliche Kapitalkosten für die Investition für den Prozess *dis* hier [Euro/a],
 C_{new} Ausbau der Kapazität hier [MW/ha],
 k_{Inv} spezifische Kapitalkosten hier [Euro/($\frac{MW}{ha}$ a ha)] und
 A Fläche der Region hier [ha].

Um die Verteilung von Fernwärme genauer abzubilden wurde ein weiterer Verlustmechanismus in *newURBS* implementiert. Dieser berücksichtigt zeitlich konstante Verluste. Bei der Fernwärmeverteilung kommt es zu jedem Zeitpunkt zu Wärmeverlusten, die⁸ nicht von der durch die Rohrleitung strömenden Wärmelast abhängig sind, sondern von der Temperatur des Mediums. Für die Regelung der Wärmelast gibt es in einfachster Form zwei Stellgrößen. Die Vorlauftemperatur wird durch die Außentemperatur festgelegt. Sie liegt zwischen 80 und 130°C. Der Massestrom wird über die Rücklauftemperatur geregelt. Dementsprechend wird das gesamte Fernwärmenetz durchgehend bei mindestens 80°C betrieben. Diese thermischen Verluste werden im Modell durch konstante Wärmeverluste je Leitungslänge berücksichtigt. Der nach der Verteilung zur Verfügung stehende Wärmestrom ergibt sich aus

$$P_{out}(sit, dis, coin, coout, t) = P_{in}(sit, dis, coin, coout, t) \cdot \eta_P(sit, dis, coin, coout) - C_{out}(sit, dis, coin, coout) \cdot \eta_C(sit, dis, coin, coout) \cdot A(sit)$$

mit

- η_P Proportionalitätsfaktor der Verluste bezüglich des Wärmestroms,
- η_C Proportionalitätsfaktor der Verluste bezüglich der Prozesskapazität (zeitlich konstante Verluste).

Neben der Einführung der Prozessklasse *dis* wurde *newURBS* von einem reinen linearen Programm auf ein gemischt ganzzahliges Optimierungsprogramm erweitert. Für die Prozessklassen *pros*, *dis* und *trans* wurden zusätzlich zur bestehenden linearen Berechnungsmöglichkeit, im Folgenden als Prozesstyp LIN bezeichnet, die Prozesstypen BOOL und SC eingeführt.

Für Prozesse des Prozesstyps BOOL ist es der Optimierung ausschließlich möglich, den Prozess in vorgegebener Kapazität entweder zu berücksichtigen oder nicht zu berücksichtigen. Es sind keine Zwischenstufen möglich. In den späteren Modellen wird dieser Prozesstyp vor allem für die Fernwärme als Verteilungsprozess genutzt. Das Fernwärmenetz kann in den verschiedenen Modell-Regionen nur vollständig oder nicht installiert werden (Abbildung 8.1).

Der Prozesstyp SC ist eine Mischung aus den Typen LIN und BOOL. Für Prozesse des Typs SC muss eine obere ($< \infty$) und untere (> 0) Kapazitätsschranke definiert werden. Die Optimierung kann die Kapazität des Prozesses entweder innerhalb der Schranken oder gleich Null wählen. Dieser Prozesstyp wird für die Modellierung von Kraftwerken genutzt, die nur innerhalb der angegebenen Schranken linear mit den gewählten Parametern genähert werden können.

Eine weitere Neuerung war die Umstellung der Berechnungseinheiten von Mengen auf Flüsse, sprich für die hier berechneten Modelle von Energie auf Leistung. Besonders bei Modellen, die nicht mit einer konstanten zeitlichen Auflösung von einer Stunde arbeiten, konnte dadurch die Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit deutlich gesteigert werden.

⁸in erster Näherung

8. Modelle

8.1. Basis-Modell

Grundlegende Parameter für die Modelle für das Augsburger Stadtgebiet sind die Nachfragen nach Strom und Wärme. Die zugrunde gelegte Wärmenachfrage beschränkt sich dabei auf die Raumwärmenachfrage und die Nachfrage nach Wärmeenergie für die Warmwasserbereitung für alle Augsburger Gebäude. Der Prozesswärmebedarf industrieller Großabnehmer wird in den Modellen nicht berücksichtigt. Eine Studie über die Nutzung von punktuellen Wärmequellen und -senken wird derzeit durch das BIFA [Hertel (2009)] durchgeführt.

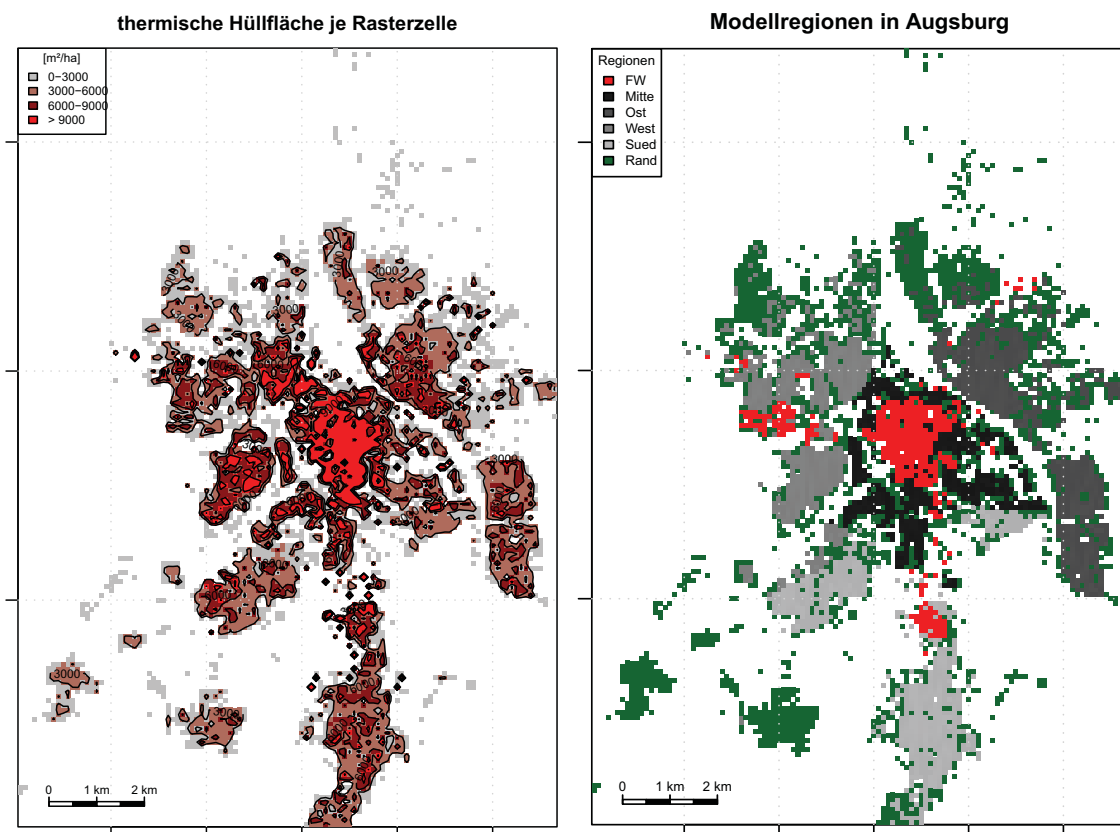


Abbildung 8.1.: Links: Fläche der Gebäudehülle je Rasterelement; Rechts: Einteilung des Stadtgebiets in Regionen.

Es war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, jedes Gebäude einzeln in der Optimierung zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurde eine Clusterung der Gebäude eingeführt. Für die Modellie-

Die Stadt wird das Augsburger Stadtgebiet in mehrere Regionen (*sit*) eingeteilt (Abbildung 8.1 rechts). Grundlage für die Einteilung bilden zwei Attribute der jeweiligen Rasterelemente $RZ_{i,j}$ aus Teil I: Die Zugehörigkeit zu Stadtbezirken und die Gesamtfläche der thermischen Hülle aller Gebäude eines Rasterelements. Die Gesamtfläche der thermischen Hülle wurde als grundlegendes Merkmal der Rasterzellen identifiziert um den potentiellen Wärmebedarf der Zellen in Klassen einteilen zu können. Das Stadtgebiet wird in die fünf Hauptregionen Ost, West, Süd, Mitte und heutiges Fernwärmegebiet (rot in Abbildung 8.1 rechts) eingeteilt. Rasterzellen mit einer Gesamtfläche der thermischen Hülle aller Gebäude $A_{th\ H}$ kleiner als $3000\text{ m}^2/\text{ha}$ aus allen fünf Hauptregionen werden als eine gemeinsame Rand Region (grün in Abbildung 8.1 rechts) definiert. Die verbleibenden Rasterzellen der Hauptregionen Ost, West, Süd und Mitte werden im Folgenden in je drei weitere Unterregionen eingeteilt (schwach: $A_{th\ H} < 6000\text{ m}^2/\text{ha}$; mittel: $6000\text{ m}^2/\text{ha} \leq A_{th\ H} < 9000\text{ m}^2/\text{ha}$; dicht: $A_{th\ H} \geq 9000\text{ m}^2/\text{ha}$) (Abbildung 8.1 links). In Tabelle 8.1 sind einige Eigenschaften der Nachfrageregionen des Modells wiedergegeben.

| | Gebäude | Fläche [ha] = Anz. RZ | Anschl- leist. P [MW] | Wärmebedarf 2010 [MWh/a] | spez. Wärmebed. 2010 [MWh/(ha a)] |
|---------------|---------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| FW | 2894 | 363 | 152 | 339223 | 934 |
| Mitte_dicht | 1643 | 137 | 60 | 172585 | 1260 |
| Mitte_mittel | 1246 | 142 | 29 | 106492 | 750 |
| Mitte_schwach | 1134 | 193 | 26 | 85960 | 445 |
| Ost_dicht | 526 | 48 | 18 | 54254 | 1130 |
| Ost_mittel | 2887 | 206 | 27 | 144585 | 702 |
| Ost_schwach | 4017 | 393 | 29 | 166638 | 424 |
| Rand | 10132 | 2065 | 33 | 304491 | 147 |
| Süd_dicht | 554 | 49 | 28 | 59603 | 1216 |
| Süd_mittel | 2510 | 188 | 23 | 117203 | 623 |
| Süd_schwach | 3701 | 383 | 22 | 149079 | 389 |
| West_dicht | 1566 | 98 | 19 | 98179 | 1002 |
| West_mittel | 2705 | 202 | 23 | 134298 | 665 |
| West_schwach | 2522 | 279 | 22 | 111326 | 399 |

Tabelle 8.1.: Regionen

Die Größe der Nachfragen und somit auch die Größe von Gebäuden spielt für die potentielle Nutzbarkeit verschiedener Systeme zur Bereitstellung von Heizwärme in Gebäuden eine entscheidende Rolle. Um dies in den folgenden Modellszenarien berücksichtigen zu können, wird für jede der 14 Modellregionen zusätzlich zwischen großen und kleine Gebäuden unterschieden.

Mit Hilfe der Methode zur Wärmebedarfsbestimmung mit stündliche Auflösung aus Teil I wird für jedes Gebäude der Stadt der Verlauf der Wärmenachfrage berechnet. In jeder Region werden sowohl die Wärmebedarfe der großen, als auch der kleinen Gebäude stundenweise summiert. Es ergeben sich 28 Zeitreihen der Wärmenachfrage für Augsburg.

Die Nachfrage nach Strom wird im Modell nicht geographisch aufgelöst. Wie bereits beschrieben ist die Entwicklung der Stromnachfrage von einer Vielzahl an Einflüssen bestimmt. Diese wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht quantifiziert. Um die Auswirkungen der im Modell untersuchten Freiheitsgrade des Energiesystems besser bestimmen zu können wurde im Modell davon ausgegangen,

dass die Stromnachfrage in der Modellregion in Menge und Verlauf über alle Modelljahre konstant bleibt.

Für die Entwicklung der spezifischen Emissionen im Deutschen Strommix wird für das Modell von zwei unterschiedlichen Entwicklungspfaden ausgegangen. Eine mögliche Entwicklung ist, dass es zu einem stark zentralisierten erneuerbaren Elektrizitätssystem kommt, mit dem die Emissionen an Kohlendioxid im Strommix und somit im Stromimport in die Modellregion stark reduziert werden können ¹.

Ein anderer Trend könnte sein, dass vorwiegend auf kommunaler und regionaler Ebene ein Umbau der Energiesysteme hin zu CO₂-ärmeren Erzeugungsprozessen von statten geht. Unter dieser Annahme kann davon ausgegangen werden, dass regional erzeugter erneuerbarer Strom eher regional verbraucht als exportiert wird. Für diesen Fall kann man annehmen, dass der Strom, der aus zentralen Kraftwerken als Grundlast-, Spitzenlast- und Regelstrom bezogen werden kann, aus heute bestehenden oder in Planung oder Bau befindlichen Kraftwerken² stammen wird. Dies würde zu gleichbleibenden, unter Umständen sogar steigenden spezifischen CO₂-Emissionen im Importstrom führen.

Für die Modellszenarien wurde neben den beiden Entwicklungspfaden eine Kombination aus beiden berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die spezifischen Emissionen für den in die Modellregion importierten Strom

- über alle Jahre konstant bleiben,
- linear von 2010 bis 2050 um 50% sinken oder
- linear von 2010 bis 2050 um 80% sinken.

Neben den Nachfragerregionen wird im Modell eine weitere Region (Erz) eingeführt, die alle Erzeugungsprozesse der Stadt bzw. der Stadtwerke beinhaltet. Über diese Region können im Modell die Primärenergieträger Strom, Gas, und Biomasse in das Modell importiert werden. Zur Deckung der Stromnachfrage stehen dem Modell neben der Option des Imports von Baseload- (**Eink_St_BI**) bzw. Peakload Stroms (**Eink_St_PI**) die Möglichkeit der Eigenerzeugung zur Verfügung. Baseload Strom kann von der Optimierung in Form von Jahresleistungsbändern³ bezogen werden. Peakload Strom kann in Form von Energieeinheiten mit spezifischen Energiekosten eingekauft werden. Der wöchentliche Verlauf der Energiepreise wurde dazu an einen typischen Verlauf der Preisentwicklung für Peakload Strom an der Europäischen Strombörse EEX angelehnt. Vom Modell stehen die Erzeugungsprozesse für Strom: Biomasseheizkraftwerk (**BM**), Gasturbine (**GT**), Dampfturbine (**DT**), Windkraftanlage (**WIND**) und Photovoltaikanlage (**PV**) zur Verfügung. Prozesse die durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz EEG (2008) geregelt werden, können 2010 entweder EEG-vergütet⁴ oder selbst genutzt werden⁵. In späteren Modelljahren wird die Vergütung über das EEG nicht weiter berücksichtigt. Zur Produktion von zentraler Wärme für eine Fernwärmeversorgung kann das Modell auf die Kraft-Wärme-Kopplungsprozesse Biomasseheizkraftwerk und Gasturbine und auf die Prozesse Gas-Heizwerk (**Gas-HW**) und Geothermie-Heizwerk (**GeoT_HW**) zurück greifen.

¹Ein Beispiel könnte das Projekt „desertec“ oder aber auch ein Erhalt bzw. Ausbau der Kernkraft (Kernfission) und ein Übergang zur Kernfusion sein.

²siehe z.B. A. Peters (2010)

³Kauf von 1 MW Leistungsband muss unabhängig von der tatsächlich abgenommenen Energiemenge Vergütet werden

⁴und somit aus der Region bilanziell exportiert werden

⁵ohne die Möglichkeit der Vergütung von Eigenstrombedarf nach §33 EEG (2008)

8. Modelle

| Erz | coin | coout | eff [1] | Cash-Inv [€] | Rate-Ext | FixCost [€/a] | FuelCost [€/MWh] | VarCost [€/MWh] | Cap-lo [MW] | Cap-up [MW] | FCoOut-lo | FCoOut-up | GLOBAL CO2 [t/MWh] | GLOBAL Staub [t/MWh] |
|------------|---------|--------|------------|-----------------|----------|------------------|---------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------|-----------|--------------------------|----------------------------|
| Eink_St_Pi | EI_D_Pi | EI | 1,00 | - | 8,4% | - | - | - | - | inf | 0% | 100% | 0,58 | - |
| Eink_St_Bi | EI_D_Bi | EI | 1,00 | 438.000 | 100,0% | - | - | - | - | inf | 0% | 100% | 0,58 | - |
| Eink_Gas | Gas_D | Gas | 1,00 | - | 100,0% | - | 38,50 | - | - | inf | 0% | 100% | - | - |
| Gas-HW | Gas | FW | 0,90 | 50.000 | 10,0% | 2.685 | - | - | - | inf | 0% | 100% | 0,20 | - |
| BM_H | BM | BM_H | 0,80 | 1.120.000 | 10,0% | 113.909 | 14,00 | 2,63 | 25 | inf | 0% | 100% | - | - |
| BM_H | BM_H | BM_KWK | 1,00 | - | 0,0% | - | - | - | - | inf | 0% | 100% | - | - |
| BM_W | BM_KWK | FW | 1,00 | - | 10,0% | - | - | - | - | inf | 75% | 75% | - | - |
| BM_KWKEEG | BM_KWK | EI_EEG | 1,00 | - | 10,0% | - | - | - | - | inf | 0% | 25% | - | - |
| BM_KWKEI | BM_KWK | EI | 1,00 | - | 10,0% | - | - | - | - | inf | 0% | 25% | - | - |
| BM_EEG | BM_H | EI_EEG | 0,38 | - | 10,0% | - | - | - | - | inf | 0% | 100% | - | - |
| BM_EI | BM_H | EI | 0,38 | - | 10,0% | - | - | - | - | inf | 0% | 100% | - | - |
| GT_H | Gas | GT_H | 0,88 | 313.394 | 10,0% | 5.704 | - | - | 67 | inf | 0% | 100% | 0,20 | - |
| GT_W | GT_H | FW | 1,00 | - | 10,0% | - | - | - | - | inf | 54% | 54% | - | - |
| GT_EI | GT_H | EI | 1,00 | - | 10,0% | - | - | 13,40 | - | inf | 0% | 46% | - | - |
| GT_BI | GT_H | dummy | 1,00 | - | 10,0% | - | - | -36,10 | - | inf | 0% | 46% | - | - |
| DT | Gas | EI | 0,38 | 805.350 | 6,9% | 16.106 | - | - | 13 | inf | 0% | 100% | 0,20 | - |
| WIND | Wind | Wind_H | 1,00 | 1.342.140 | 8,4% | 32.211 | - | - | 4 | inf | 0% | 100% | - | - |
| WIND | Wind_H | EI_EEG | 1,00 | - | 8,4% | - | - | - | - | inf | 0% | 100% | - | - |
| WIND | Wind_H | EI | 1,00 | - | 8,4% | - | - | - | - | inf | 0% | 100% | - | - |
| GeoT_HW | EI | FW | 50,00 | 1.575.000 | 8,4% | 31.500 | - | - | - | 5 | 0% | 100% | - | - |
| PV | GlobStr | EI | 1,00 | 4.500.000 | 10,0% | - | - | - | - | inf | 0% | 100% | - | - |

Abbildung 8.2.: Prozesse der Region Erzeugung (Erz)

Für sämtliche dezentrale Prozesse wird die Region Gebäude (Geb) definiert. In dieser Region können vom Modell die Prozesse Gasheizung (**GasHeiz**), Wärmepumpe (**WP**), Ölheizung (**Oel-Heiz**), Biomasseheizung (**BM-Heiz**), Blockheizkraftwerk (**BHKW**) und solarthermische Kollektoranlage (**SolarKoll**) genutzt werden.

Die Anschaffungskosten für solche Anlagen können nur bedingt durch eine zur Anlagenkapazität lineare Funktion beschrieben werden. Im Allgemeinen haben kleine Anlagen höhere spezifische Anschaffungskosten pro Kapazität als größere Anlagen. Um dies zu berücksichtigen wurden, wie bereits beschrieben, die Augsburger Gebäude in zwei Gebäudegrößenklassen eingeteilt. Für kleine Gebäude wurden im Modell höhere spezifische Investitionskosten angesetzt als für große. **BHKWs** können im Modell nur in großen Gebäuden installiert werden.

| Geb | coin | coout | eff [1] | Cash-Inv [€] | Rate-Ext | FixCost [€/a] | FuelCost [€/MWh] | VarCost [€/MWh] | Cap-lo [MW] | Cap-up [MW] | FCoOut-lo | FCoOut-up | GLOBAL CO2 [t/MWh] | GLOBAL Staub [t/MWh] |
|-------------|-----------|----------|------------|-----------------|----------|------------------|---------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------|-----------|--------------------------|----------------------------|
| GasHeiz | Gas_Geb | grW_GS | 0,85 | 100.000 | 10,0% | 20.400 | - | - | - | inf | 0% | 100% | 0,20 | 0,00 |
| SolarKollG | grGlobStr | grW_GS | 1,00 | 377.000 | 10,0% | - | - | - | - | 800 | 0% | 100% | - | - |
| WP | EI | grW_WPS | 3,90 | 1.500.000 | 8,4% | 47.000 | - | - | - | inf | 0% | 100% | - | - |
| SolarKollWP | grGlobStr | grW_WPS | 1,00 | 377.000 | 10,0% | - | - | - | - | 800 | 0% | 100% | - | - |
| Oel-Heiz | Oel | grW_OS | 0,85 | 118.108 | 10,0% | 22.500 | 50,00 | - | - | inf | 0% | 100% | 0,27 | 0,01 |
| SolarKollO | grGlobStr | grW_OS | 1,00 | 377.000 | 10,0% | - | - | - | - | 800 | 0% | 100% | - | - |
| BHKW_H | Gas_Geb | BHKW_H | 0,75 | 573.333 | 13,3% | - | - | - | - | inf | 0% | 100% | 0,20 | 0,00 |
| BHKW_EI | BHKW_H | EI | 1,00 | - | 13,3% | - | - | 32,00 | - | inf | 33% | 33% | - | - |
| BHKW_W | BHKW_H | grW_BHKW | 1,00 | - | 13,3% | - | - | - | - | inf | 67% | 67% | - | - |
| GasHeiz | Gas_Geb | grW_BHKW | 0,85 | 100.000 | 10,0% | 20.400 | - | - | - | inf | 0% | 100% | 0,20 | - |
| BM-Heiz | BM | grW_BMS | 0,86 | 160.650 | 10,0% | 24.150 | 47,00 | - | - | inf | 0% | 100% | - | 0,06 |
| SolarKollBM | grGlobStr | grW_BMS | 1,00 | 377.000 | 10,0% | - | - | - | - | 800 | 0% | 100% | - | - |
| GasHeiz | Gas_Geb | kiW_GS | 0,85 | 483.171 | 0,0% | 20.400 | - | - | - | inf | 0% | 100% | 0,20 | 0,00 |
| SolarKollG | kiGlobStr | kiW_GS | 1,00 | 377.000 | 10,0% | - | - | - | - | 800 | 0% | 100% | - | - |
| WP | EI | kiW_WPS | 3,90 | 1.500.000 | 8,4% | 47.000 | - | - | - | inf | 0% | 100% | 0,27 | - |
| SolarKollWP | kiGlobStr | kiW_WPS | 1,00 | 377.000 | 10,0% | - | - | - | - | 800 | 0% | 100% | - | - |
| BM-Heiz | BM | kiW_BMS | 0,86 | 803.250 | 10,0% | 24.150 | 47,00 | - | - | inf | 0% | 100% | - | 0,06 |
| SolarKollBM | kiGlobStr | kiW_BMS | 1,00 | 377.000 | 10,0% | - | - | - | - | 800 | 0% | 100% | - | - |
| Oel-Heiz | Oel | kiW_OS | 0,85 | 590.542 | 10,0% | 22.500 | 50,00 | - | - | inf | 0% | 100% | 0,27 | 0,01 |
| SolarKollO | kiGlobStr | kiW_OS | 1,00 | 377.000 | 10,0% | - | - | - | - | 800 | 0% | 100% | - | - |

Abbildung 8.3.: Prozesse der Region Gebäude (Geb)

Mit Hilfe der Verteilungsprozesse (*dis*) Fernwärmenetz und Gasnetz können die Endenergieträger Fernwärme und Gas flächig in den Regionen verteilt werden. Für das Fernwärmenetz wird von einem

Installationsaufwand von 800 Euro/m, 200 m Netzlänge pro Hektar, spezifischen Wärmeverlusten von 50 W pro Meter Trassenlänge und einer Lebenszeit von 35 Jahren ausgegangen.

Als primäre Energieträger für das Stadtgebiet können Grundlast- und Spitzenlaststrom, Erdgas, Erdöl und Biomasse importiert werden. Der Import von Biomasse ist dabei für alle Modell-Szenarien auf $700\,000\text{ MWh a}^{-1}$ beschränkt. Diese Beschränkung wurde anhand einer Reihe von Annahmen abgeschätzt. Es wurde davon ausgegangen, dass das Einzugsgebiet für Biomasse aufgrund steigendem Konkurrenzdruck durch die Biomassenachfrage benachbarter Städte und Regionen auf ca. 30 km beschränkt ist. Die Nutzbarkeit von Flächen für den Anbau von Biomasse zur Energieversorgung wurde auf 5%, der Wirkungsgrad der Photosynthese bis zur verwertbaren Endenergie auf 0,5% geschätzt.

Für die folgenden Modelle wurde eine Auflösung von 8 h gewählt. Mit dieser Auflösung können gleichzeitig die zeitlichen Fluktuationen in der täglichen Stromnachfrage in hinreichender Genauigkeit berücksichtigt werden als auch den Beschränkungen der Rechenkapazitäten Rechnung getragen werden.

8.2. Referenz Szenario 2010

Zur Verifizierung des Modells wurden der Optimierung für das Szenario 2010_ist die heutigen Kapazitäten der Erzeugungsprozesse, die Ausdehnung des heutigen Fernwärmenetzes und die heutige Kostenstruktur vorgegeben. Das Modell kann in diesem Fall die Fahrweise der Prozesse bestimmen. Im Modell werden ca. 2000 GWh für Raumwärme + Warmwasserbereitstellung nachgefragt. Der Bedarf an Strom im Augsburger Stadtgebiet liegt bei ca. 1900 GWh/a [Aug (2008)]. Die von der Optimierung gewählte Fahrweise der Prozesse ist in den Diagrammen 8.4 zu sehen.

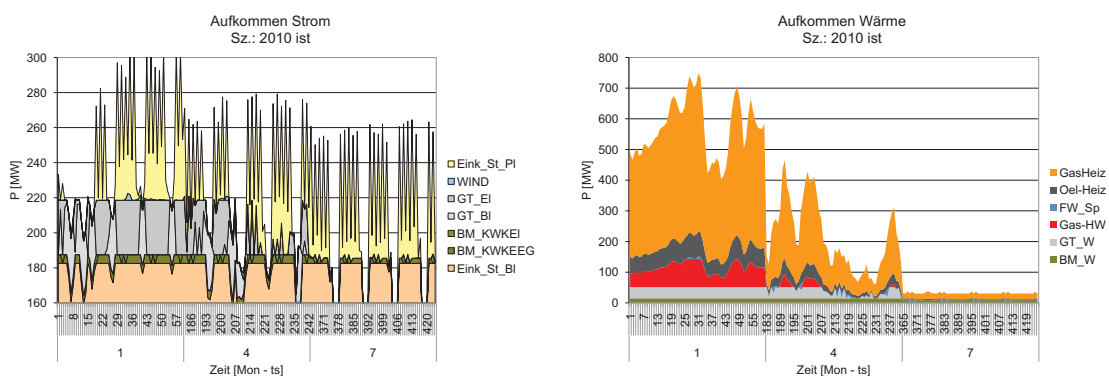


Abbildung 8.4.: Aufkommen Wärme und Strom im Augsburger Stadtgebiet für das Modellszenario 2010_ist. Dargestellt sind repräsentativ für ein ganzes Jahr die mittleren Leistungen der Erzeugung bzw. des Imports für die Monate Januar (1), April (4) und Juli (7). Die zeitliche Auflösung beträgt 8 h.

Abbildung 8.5 zeigt für die Endenergien Strom und Wärme die Verteilung auf die jeweiligen Erzeugungstechnologien.

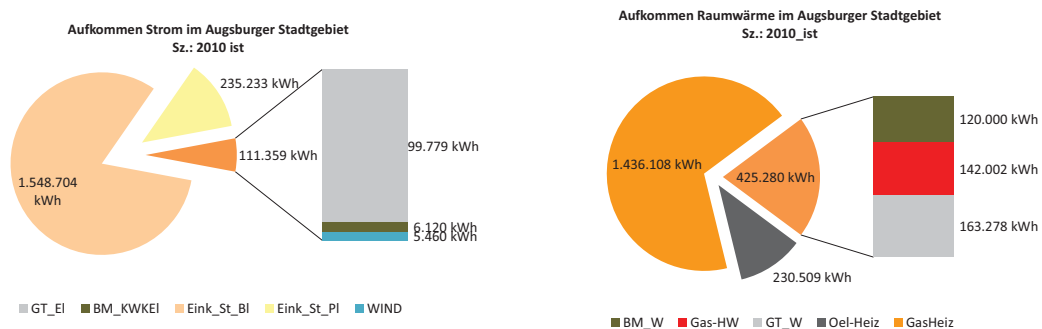


Abbildung 8.5.: Aufkommen Strom und Raumwärme + Warmwasserbedarf für das Modellszenario 2010_ist.

Der größte Teil an Strom wird in Form von Base- bzw. Peakload Strom bezogen. Die Fahrweise der Erzeugungsprozesse für Strom wurde mit der tatsächlichen Fahrweise der Prozesse der Stadtwerke Augsburg verglichen. Das Modell bildet die Fahrweise des Biomasse-BHKW (BM) und der Gasturbine (GT) in hinreichender Genauigkeit ab. Dahingegen wird im Gegensatz zur tatsächlichen Fahrweise im Modell die Dampfturbine nicht genutzt.

Für die Versorgung des Augsburger Stadtgebiets mit Wärme und Strom müssen im Modell jährlich 529 Mio. € aufgewendet werden. Es werden 1,546 Mt/a Kohlendioxid emittiert.

8.3. Szenarien 2020

Ziel der Optimierung der Szenarien ist es, einen möglichst optimalen Endzustand des städtischen Energiesystems bis zum Jahre 2050 zu ermitteln. Als Ziel für das Jahr 2050 wird eine Reduktion der städtischen CO₂-Emissionen im Vergleich zu den Emissionen von 2010 um 80% gesetzt⁶. Als Zwischenziele wird davon ausgegangen, dass pro Jahrzehnt 20% an Emissionen bezogen auf das Jahr 2010 reduziert werden sollen. Ein Teil dieses Emissionsrückgangs wird bereits durch die verringerte Wärmenachfrage aufgrund des Klimawandels und aufgrund von wärmetechnischen Sanierungen der Gebäude im Stadtgebiet realisiert⁷. Weiterführende Ziele müssen durch den Umbau der Erzeugungsstruktur bewerkstelligt werden⁸.

In allen Szenarien nach 2010 wird keine Vergütung des Stromes nach dem Erneuerbare Energien Gesetz oder dem KWK-Gesetz berücksichtigt. Diese haben keine volkswirtschaftlichen Auswirkungen, da sie in der Modellregion von den Stromkonsumenten in gleichem Maße wieder erbracht werden müssen⁹. In den Szenarien bis einschließlich 2020 müssen von der Optimierung die heutigen

⁶Die Emissionen des Referenzenergiesystems werden für das Jahr 2010 auf 1,5 Mio. t festgelegt.

⁷Der Rückgang der Wärmenachfrage ist nicht Bestandteil der Optimierung sondern wird als Parameter, berechnet mit Hilfe des Wärmeatlas aus angenommenen Sanierungsraten vorgegeben.

⁸Die Erzeugungsstruktur ist durch die Variablen der Optimierung festgelegt.

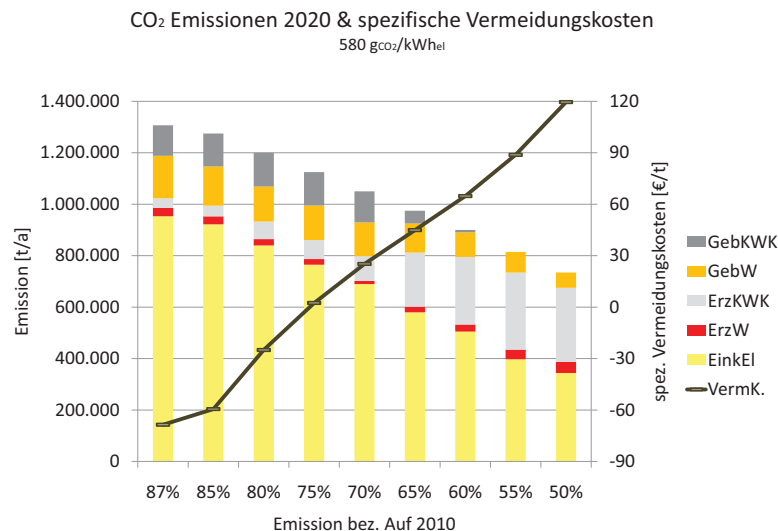
⁹unter der Annahme dass der Ausbau der EEG-Vergüteten Prozesse außerhalb der Modellregion in ähnlichem Maße betrieben wird.

Erzeugungs- und Netzkapazitäten erhalten werden¹⁰. Ab dem Jahr 2030 sind weder Erzeugungs- noch Fernwärmenetzkapazitäten vorgegeben¹¹. Die Optimierung kann frei sämtliche Kapazitäten installieren.

Die Entwicklung der spezifischen Vermeidungskosten wird für alle Szenarien auf das Referenzszenario 2010_{ist} bezogen.

8.3.1. 2020, San=1%, CO₂ Strom = 580 g/kWh

In den folgenden Szenarien wird die Auswirkung von Reduktionszielen für die Emission von CO₂ für das Jahr 2020 mit einer Sanierungsrate der Augsburger Gebäude von 1% pro Jahr und spezifischen CO₂ Emissionen des importierten Stromes von 580 g kWh⁻¹ untersucht. Das Modell hat zusätzlich zu den heute installierten Prozess- und Transportkapazitäten die Möglichkeit beliebig weitere Kapazitäten zuzubauen.



Abbildungung 8.6.: CO₂-Emissionen der Energieversorgung nach Sektoren und spezifische CO₂-Vermeidungskosten bezogen auf die Gesamtkosten und Gesamtemissionen des Referenzszenarios 2010 in Abhängigkeit der Reduktionsziele. GebKWK: Emissionen aus dezentralen BHKWs; GebW: dezentrale Gebäudeheizung; ErzKWK: zentrale KWK-Prozesse (GT); ErzW: zentrale Wärmeerzeugung (Gas-HW); EinkEl: Import von Strom.

Die Versorgung der Nachfragen¹² unter minimalen Kosten und unter Vorgabe des Erhalts der heute

¹⁰In der Optimierung sind keine Kapazitäten vorinstalliert. Es müssen jedoch in jedem Szenario mindestens die heutigen Kapazitäten installiert werden. Dadurch wird erreicht, dass in den Modellen auch die heutigen Kapitalkosten für noch nicht vollständig abgeschriebene Investitionen mit berücksichtigt werden.

¹¹Das Gasnetz muss bis einschließlich 2030 in der Optimierung erhalten werden, da davon ausgegangen wurde, dass für Industrieprozesse bis 2030 auf jeden Fall ein Gasnetz betrieben werden muss.

¹²Gleichbleibende Stromnachfrage, sinkende Wärmenachfrage um 8,1%

installierten zentralen Erzeugungsprozesse^{13 14} oder des Zubaus von Kapazitäten ohne die Beschränkung der CO₂-Emissionen führt zu einer Verringerung der volkswirtschaftlichen Kosten für das Augsburger Stadtgebiet von 528,9 auf 512,5 Mio. € pro Jahr. Gleichzeitig sinken die Gesamtemissionen von CO₂ von 1,55 Mt/a um 15,5% auf 1,31 Mt/a. Dies führt, im Vergleich zum Referenzszenario 2010 zu negativen spezifischen Vermeidungskosten von 69 € pro Tonne (Abbildung 8.6 Vermeidungskosten für 87% Emission bez. auf 2010). Die Sanierungsraten der Gebäude sind dabei nicht Bestandteil der Optimierung. Dementsprechend bleibt der Investitionsaufwand für die Sanierung der Gebäude in allen Szenarien unberücksichtigt, wodurch ein Teil der Kostenreduktion begründet ist. Weitere Reduktionen und Kosteneinsparungen erzielt die Optimierung bei den gewählten Parametern durch einen anderen Aufbau der dezentralen Wärmeerzeugung. Hier wurden vorwiegend Ölheizungen durch Biomasseheizungen ersetzt, was bei den angenommenen Parametern sowohl zu einer Kosten- als auch Emissionsreduktion führt. Der deutlich größte Teil der Emissionen fällt durch den Import von Strom an (Abbildung 8.6).

Unter den gegebenen Rahmenbedingungen wählt die Optimierung auch ohne Beschränkung der CO₂-Emissionen in großen Gebäuden BHKWs mit einer Gesamtleistung von 28,7 MW_{el} zur Bereitstellung von Wärme und Strom. Diese werden so dimensioniert, dass sie mit ca. 5000 h/a betrieben werden können. Die verbleibende Wärmenachfrage in den jeweiligen Gebäuden wird mit einem Spitzenlast- bzw. Backup-Gaskessel erzeugt.

Die Optimierung muss bei steigenden Reduktionszielen auf Vermeidungsstrategien mit sukzessiv steigenden spezifischen CO₂-Vermeidungskosten zurückgreifen (siehe Abbildung 8.6). Um steigende Reduktionsziele erreichen zu können erhöht die Optimierung kontinuierlich die Produktion von Strom aus Biomasse leicht, von KWK-Strom und Windstrom deutlich. Die Erhöhung der Stromproduktion aus Biomasse wird im Sommer durch eine Nutzung des bestehenden Biomasseheizkraftwerks zur reinen Stromerzeugung, also ohne die Auskopplung von Wärme (Prozess **BM_El**) realisiert. KWK-Strom- und Windstromproduktion werden durch den Zubau an Erzeugungskapazitäten gesteigert. Durch diese Maßnahmen kann der Bedarf an importiertem Strom deutlich gesenkt werden (Abbildung 8.7). Allerdings kommt es, um das stark fluktuierende Windstromangebot ausgleichen zu können, zu einer deutlichen Verschiebung beim importierten Strom von Grundlaststrom hin zum vollständigen Bezug von Spitzenlaststrom. Daraus resultiert eine Verteuerung der durchschnittlichen Importkosten für Strom von 54,6 € auf 68,0 € pro MWh.

Im Winter wird unter steigenden Reduktionszielen verstärkt KWK-Strom eingesetzt um die Versorgungslücke zwischen Wind- und Biomassestromerzeugung und der Stromnachfrage zu schließen (Abbildung 8.8). Die Nutzung der KWK-Prozesse wird im Modell von der Optimierung sowohl durch die Strom- als auch durch die Wärmenachfrage beschränkt. Dies führt dazu, dass die Eigenstromerzeugung im Sommer meistens bei weitem nicht ausreicht um die Stromnachfrage zu decken. Der fehlende Strom wird im Modell in Form von Spitzenlaststrom importiert.

Der Ausbau der Windanlagen führt mit steigenden Kapazitäten teilweise zu einer Überproduktion an Strom. Im Modell kann dieser Strom in benachbarte Regionen abgegeben werden, allerdings ohne Vergütung des Stromes¹⁵. Bei großem Windangebot werden sowohl zentrale, als auch dezentrale KWK-Anlagen gedrosselt, um ein Überangebot an Strom möglichst zu vermeiden.

¹³Gasturbine, Biomasse-HKW, Dampfturbine, Ausdehnung des heutigen Fernwärme- und Gasnetzes.

¹⁴dezentrale Prozesse werden nicht vorgegeben. Daraus folgt, dass die Optimierung ohne Berücksichtigung der heute installierten Prozesse (Gasheizung, Ölheizung) dezentrale Prozesse installieren kann.

¹⁵Es kann davon ausgegangen werden, dass im Windfall auch benachbarte Regionen ein Überangebot an Wind aufweisen. Dies führt zu einem Verfall des Strompreises zu Zeiten mit hohem Windangebot.

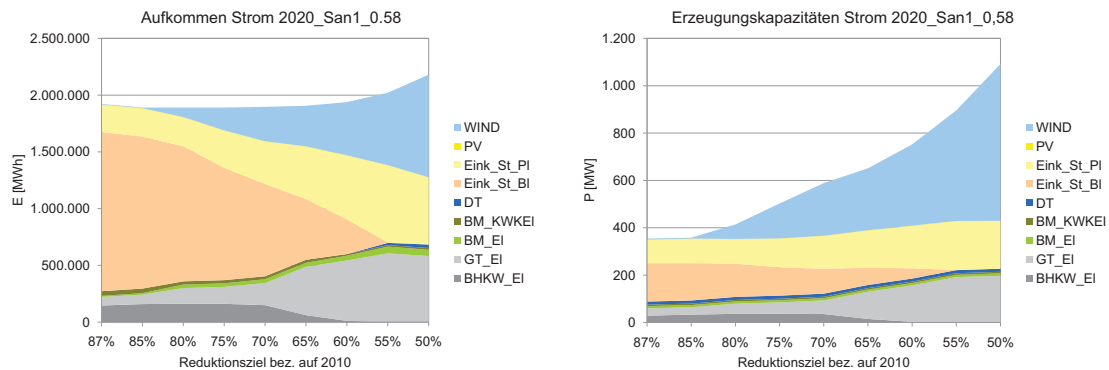


Abbildung 8.7.: Sz.: 2020 San=1% CO₂ Strom = 580 g/kWh. Links: Aufkommen Strom; rechts: Erzeugungskapazitäten für Strom im Augsburger Stadtgebiet für steigende CO₂-Reduktionsziele für das Jahr 2020 bei 1% Sanierungsraten und 580 gCO₂/kWh_{el} im Importstrom.

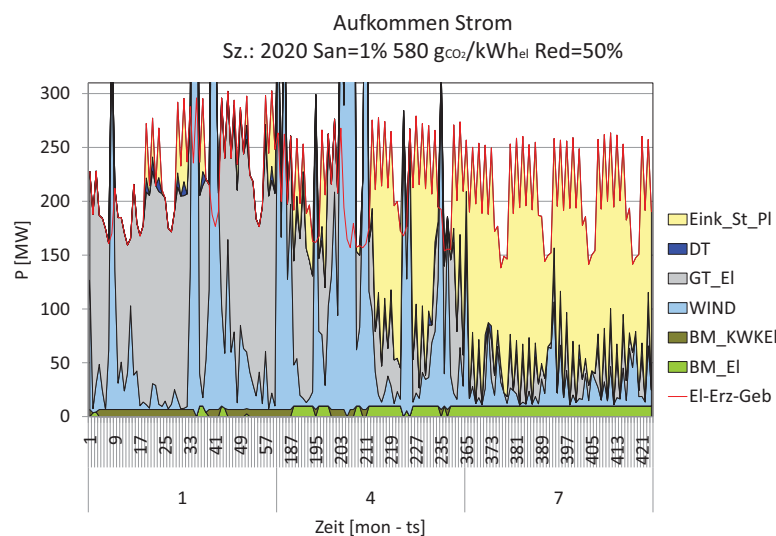


Abbildung 8.8.: Lastverlauf des Stromaufkommens im Augsburger Stadtgebiet für das Reduktionsziel -50% für die Monate Januar (1), April (4) und Juli (7). Die rote Linie beschreibt die Stromnachfrage im Stadtgebiet.

Zur Deckung der Wärmenachfrage unterscheiden sich die Strategien in den unterschiedlichen Stadtregionen und bei unterschiedlichen Reduktionszielen (Abbildung 8.9). Bis zu einem Reduktionsziel von -30% wird das Fernwärmenetz nicht ausgebaut, jedoch der Anteil der KWK-Wärme im bestehenden Fernwärmenetz erhöht. In den übrigen Modell-Regionen werden in größeren Gebäuden BHKWs mit Spitzenlast-Gaskesseln oder Biomasseheizungen in Kombination mit Solarthermieanlagen installiert. In kleineren Gebäuden werden Gaskessel in Kombination mit Solarthermieanlagen installiert. Die Wärmepumpe findet in der Optimierung keine Berücksichtigung. Dies liegt zum Teil an den hohen Kapitalkosten von 126 € pro kW und Jahr. Darüber hinaus ist im Modell kein vergünstigter Stromta-

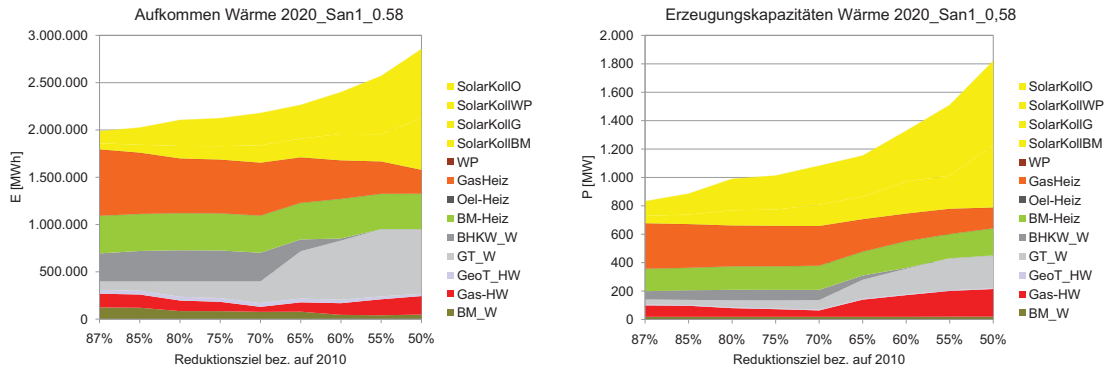


Abbildung 8.9.: Sz.: 2020 San=1% CO₂ Strom = 580 g/kWh. Links: Aufkommen Wärme; rechts: Erzeugungskapazitäten für Wärme im Augsburger Stadtgebiet für steigende CO₂-Reduktionsziele für das Jahr 2020 bei 1% Sanierungsraten und 580 gCO₂/kWh_{el} im Importstrom.

rif für den Betrieb der Wärmepumpe implementiert. Beides führt dazu, dass die Wärmepumpe nicht genutzt wird. Neben diesen eher hohen Kosten für Wärme aus einer Wärmepumpe ist das Reduktionspotential für CO₂ Emissionen zum Teil begrenzt. Im Modell entstünde, vornehmlich im Winter durch die Nutzung von Wärmepumpen, ein zusätzlicher Strombedarf. Dieser würde im Allgemeinen durch einen höheren Import von Strom in die Region gedeckt. Bei spezifischen Emissionen im Importstrom von 580 g/kWh und einer Jahresarbeitszahl von 3,9 ergeben sich spezifische Emissionen für die bereitgestellte Wärme von 149 g/kWh_{th}¹⁶.

Bei Beschränkung der CO₂-Emissionen auf weniger als 70% bezogen auf das Referenzszenario 2010 wird das Fernwärmenetz ausgebaut. In gleichem Maße werden die zentralen KWK-Kapazitäten erweitert. In den Fernwärmegebieten werden große und kleine Gebäude mit Fernwärme versorgt. BHKW-Anlagen werden durch den Ausbau der Fernwärme verdrängt. Das höhere Reduktionspotential der Fernwärme ist vor allem durch die höhere Stromkennzahl der Gasturbine¹⁷ im Vergleich zu den BHKWs¹⁸ und somit einer stärkeren Reduktion des nötigen Importstromes zu erklären.

Sowohl bei zentralen als auch bei dezentralen KWK-Anlagen wird im Modell zu Zeiten mit hohem Windstromangebot die Produktion von KWK-Wärme reduziert, bzw. gestoppt. Die Wärmenachfrage wird dann mittels Backup-Wärmeerzeugern bereitgestellt. Für diesen Fall könnte eine Nutzung der Überproduktion an Elektrizität zur Wärmeerzeugung genutzt werden. Ein solcher Ansatz ist beispielsweise in West-Dänemark verwirklicht (vgl. Maegaard (2010)). Um dezentrale Anlagen so in die Energiebereitstellung einzubinden, müssten diese in Form eines „virtuellen Kraftwerks“ zentral gesteuert werden. Gegebenenfalls ist es denkbar, dass solche BHKWs automatisch über den aktuellen Strompreis geregelt werden können.

In den nicht fernwärmeversorgten Gebieten wird wiederum auf eine Bereitstellung der Wärme mittels Biomasseheizungen bzw. Gasheizungen in Verbindung mit Solarthermieanlagen zurück gegriffen.

¹⁶im Vergleich Gasheizung: 235 g/kWh_{th}

¹⁷0,85

¹⁸0,49

Bei geringen Reduktionszielen werden Solarthermieranlagen vorwiegend zur Bereitstellung von Warmwasser genutzt. Mit steigendem Zwang zur Reduktion von CO₂-Emissionen werden in zunehmendem Maße die Solarthermieranlagen zur Heizungsunterstützung eingesetzt. Somit kommt es im Sommer zu einem deutlichen Überschuss an solarer Wärme (Abbildung 8.10).

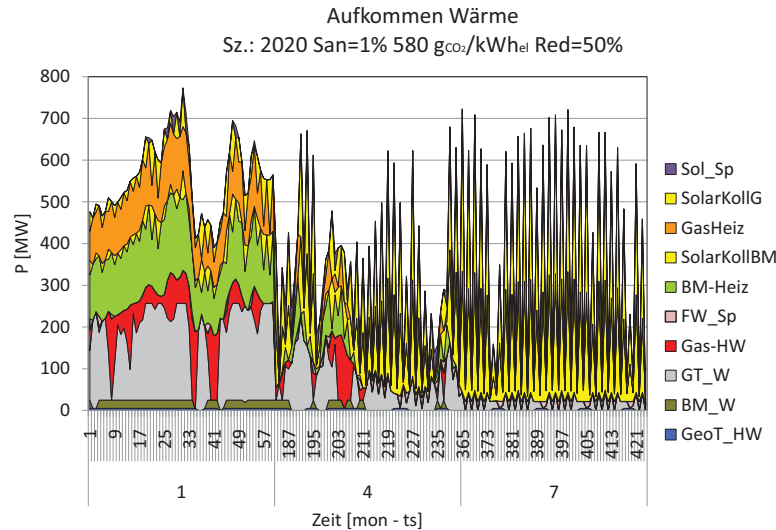


Abbildung 8.10.: Sz.: 2020 San=1% CO₂ Strom = 580 g/kWh. Aufkommen von Wärme im Augsburger Stadtgebiet für das Reduktionsziel -50% für die Monate Januar, April und Juli.

In sämtlichen Szenarien wird das gesamte jährliche Aufkommen an energetisch nutzbarer Biomasse verwendet. Dadurch treten Wärme-, Strom- und kombinierte Wärme- & Stromerzeugung aus Biomasse in Konkurrenz. Mit steigenden Reduktionszielen werden sowohl die dezentrale Wärme- als auch die zentrale Stromerzeugung aus Biomasse gesteigert. Demgegenüber wird die kombinierte Strom- und Wärmeproduktion reduziert. Grund für die Reduktion der Nutzung der Biomasse in KWK-Fahrweise ist, vorwiegend im Sommer, die Konkurrenz der KWK-Wärme aus Biomasse zur KWK-Wärme aus der Gasturbine. Wird die Biomasse rein verstromt kann in Kombination mit der Gasturbine im KWK-Betrieb ein insgesamt größerer Anteil am Importstrom und somit an Emissionen vermieden werden (Abbildung 8.8).

8.3.2. 2020, San=1%, CO₂ Strom = 464 g/kWh

Geht man davon aus, dass es gelingt die spezifischen CO₂-Emissionen im Deutschen Strommix deutlich zu reduzieren¹⁹, wählt die Optimierung andere Prioritäten der Vermeidungsstrategie.

Für das Szenario ohne Begrenzung der Emissionen installiert die Optimierung sowohl für Strom als auch für Wärme einen ähnlichen Kapazitätenmix wie im zuvor beschriebenen Fall. Es werden ebenso in großen Gebäuden BHKWs installiert. Durch die reduzierten CO₂-Emissionen im Stromimport

¹⁹vom Jahr 2010 bis zum Jahr 2020 von 580 g/kWh um 20% auf 464 g/kWh

können die Gesamtemissionen in der Modellregion bereits auf 74% reduziert werden. Das langfristige Ziel -20% bis 2020 wird dadurch bereits im kostenoptimalen Fall übertroffen (Abbildung 8.11 bei Emissionen bezogen auf 2010 von 74%).

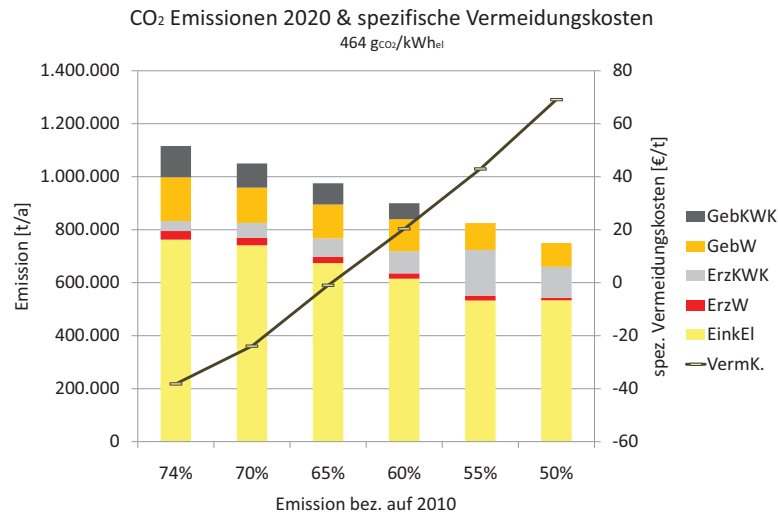


Abbildung 8.11.: CO₂-Emissionen der Energieversorgung nach Sektoren und spezifische CO₂-Vermeidungskosten bezogen auf die Gesamtkosten und Gesamtemissionen des Referenzszenarios 2010 in Abhängigkeit der Reduktionsziele für das Jahr 2020.

In den Abbildungen 8.12 und 8.13 sind die wichtigsten Eigenschaften des jeweiligen optimalen Energiesystems für unterschiedliche Reduktionsziele gezeigt.

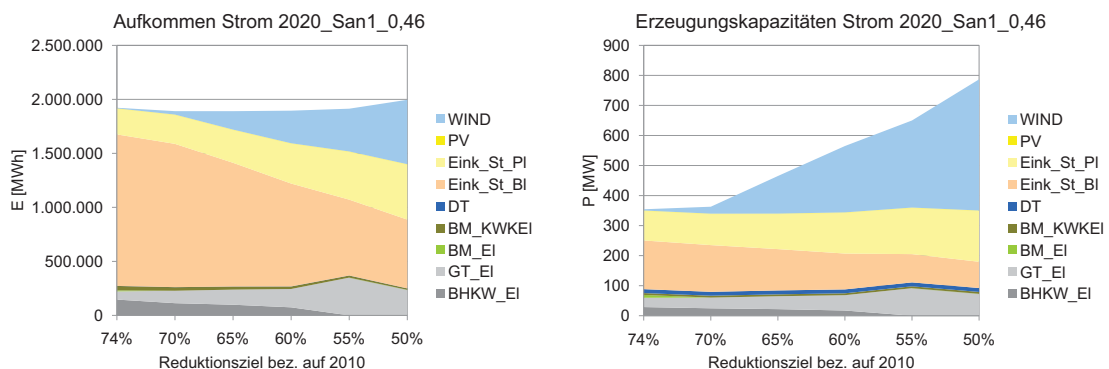


Abbildung 8.12.: Sz.: 2020 San=1% CO₂ Strom = 464 g/kWh. Aufkommen und Kapazität im Stromsektor im Augsburger Stadtgebiet für steigende CO₂-Reduktionsziele.

Wie bereits beschrieben ist das Reduktionspotential von KWK-Prozessen die mit fossilen Energieträgern betrieben werden von den spezifischen Emissionen der ersetzten Primärenergieträger abhängig. Dies führt in den Szenarien mit niedrigeren spezifischen Emissionen im importierten Strom dazu, dass

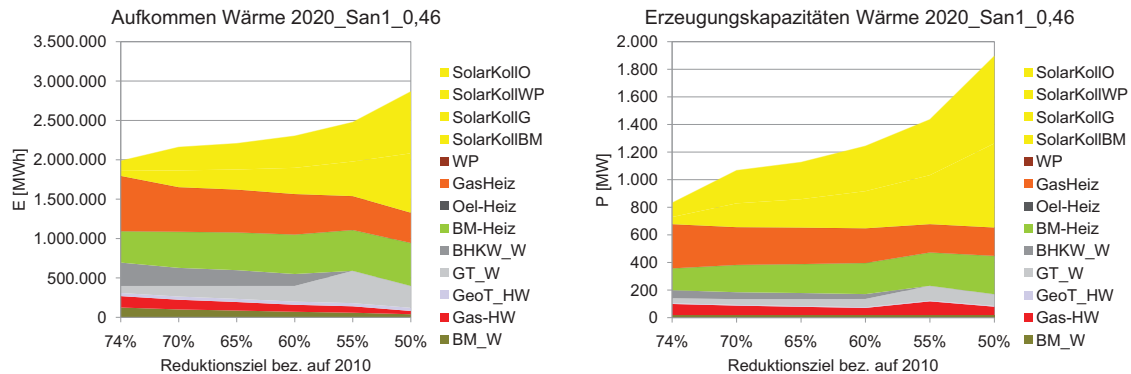


Abbildung 8.13.: Sz.: 2020 San=1% CO₂ Strom = 464 g/kWh. Aufkommen und Kapazität im Wärmesektor im Augsburger Stadtgebiet für steigende CO₂-Reduktionsziele.

mit steigenden Reduktionszielen durch die Optimierung eine geringere Gesamtkapazität an dezentralen BHKWs installiert wird. Auf Grund der höheren Stromkennzahl der Gasturbine erhöht die Optimierung dahingegen Kapazität und Auslastung der Gasturbine von 36 MW_{el} bei 3200 h/a bis zum Reduktionsziel von -45% bezogen auf 2010 auf 92 MW_{el} bei 3800 h/a. Um die anfallende KWK-Wärme zu nutzen wird bei dem Reduktionsziel -45% das Fernwärmenetz geringfügig²⁰ erweitert. Bei höheren Reduktionszielen reicht ebenso auch das Einsparpotential der Kraft-Wärme-Kopplung aus der Gasturbine nicht mehr aus um die Vorgaben einzuhalten. Für diesen Fall²¹ installiert die Optimierung die Gasturbine mit 73 MW_{el} und baut das Fernwärmenetz nicht aus. Die höheren Emissionsziele werden dann durch einen verstärkten Ausbau von Windkraftanlagen im Stromsektor und Solarthermiekollektoren im Wärmesektor realisiert.

Das Biomasseheizkraftwerk hat in diesen Szenarien, anders als bei entsprechend höheren spezifischen CO₂-Emissionen im Strom, im KWK-Betrieb ein höheres Einsparpotential für CO₂ als bei der Fahrweise der reinen Stromproduktion.

Bei geringeren spezifischen CO₂-Emissionen im Strom konzentriert sich die Optimierung in höherem Maße auf den Wärmesektor. Die Wärmeerzeugung mittels Solarthermie spielt hier eine größere Rolle um Emissionen zu reduzieren. Um die Stromnachfrage zu decken muss bei gleichen Reduktionszielen deutlich weniger importierter Strom durch Wind- und KWK-Strom ersetzt werden. Die spezifischen Vermeidungskosten fallen geringer aus als bei höheren spezifischen CO₂-Emissionen im importierten Strom.

8.3.3. 2020, San=2%

Geht man ab den Jahr 2010 von einer Sanierungsrate für energetische Sanierungen in den Gebäuden von 2% pro Jahr aus, verringert sich der Wärmebedarf in den Jahren von 2010 bis 2020 im Modell im gesamten Stadtgebiet um 21,3%, im heutigen Fernwärmegebiet um 20,7%. Dies reduziert die Strommenge die mittels zentraler KWK produziert werden kann. Im Übrigen sind die Vermeidungsstrategien vergleichbar mit den Szenarien mit einer Sanierungsrate von 1%.

²⁰um die Modellregion Mitte Dicht

²¹vgl Abbildung 8.11 Reduktionsziel -50%

8.3.4. 2020, Zusammenfassung

Sowohl der Anteil an regenerativ erzeugtem Strom als auch der an Wärme steigt mit der Beschränkung von CO₂-Emissionen, unabhängig von Sanierungsraten²² und spezifischen Emissionen im Importstrommix²³ (Abbildung 8.14). Dabei verschieben sich jedoch die Prioritäten der Vermeidungsstrategie

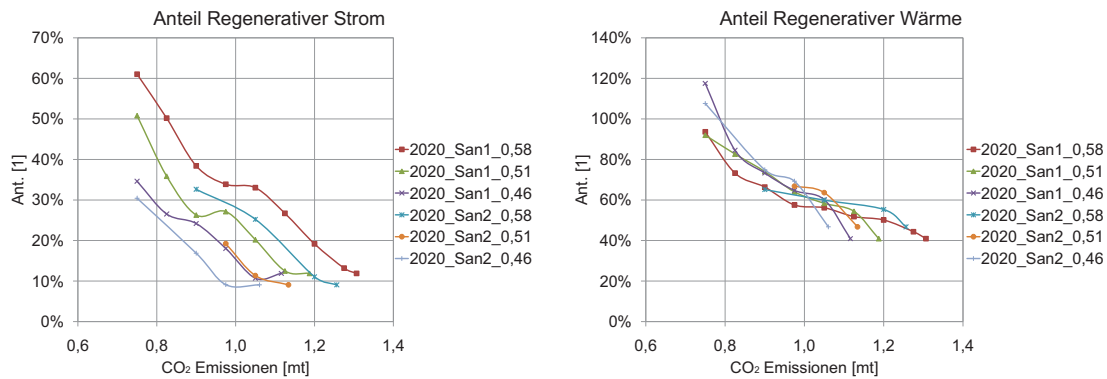


Abbildung 8.14.: Anteil des regenerativ erzeugten Stromes (links) und der regenerativ erzeugten Wärme (rechts) am Gesamtaufkommen an Strom und Wärme für das Jahr 2020 für unterschiedliche CO₂-Reduktionsziele. Die Nomenklatur der Szenarien folgt dabei der Konvention: Jahr _ Sanierungsrate in Prozent _ spezifische Emissionen im Importstrom in t/MWh.

mit den spezifischen Emissionen im importierten Strommix. Je höher die spezifischen Emissionen desto schwerer gewichtet die Optimierung die Vermeidung von Importstrom.

Ebenso ist das Einsparpotential von KWK-Prozessen und somit auch der Fernwärme von den Rahmenbedingungen, insbesondere von den Emissionen im ersetzten Strom abhängig (Abbildungen 8.15 und 8.16). Ein Ausbau der fossilen Kraft-Wärme-Kopplung und einer auf ihr basierenden Fernwärmeversorgung kann ihre Stärken nur dann ausspielen, wenn die spezifischen Emissionen im Strom in etwa auf heutigem Niveau bleiben oder gar steigen (Abbildung 8.15). Bei sinkenden spezifischen Emissionen im Importstrom sinkt auch das Reduktionspotential von fossilen KWK-Prozessen. Bei stark sinkenden spezifischen Emissionen im Importstrom und sehr hohen Minderungszielen sind fossil befeuerte KWK-Prozesse sogar kontraproduktiv (siehe Abbildung 8.15 Szenario 2020_San1_0,46).

²² 1% und 2%

²³ 580, 508 und 464 gCO₂/kWh_{el}

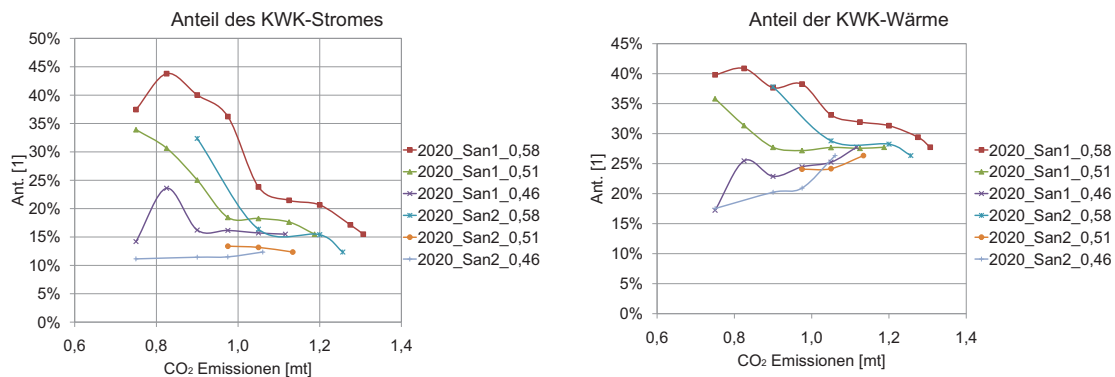


Abbildung 8.15.: Anteil des KWK-Stromes (links) und der KWK-Wärme (rechts) am Gesamtaufkommen an Strom und Wärme für das Jahr 2020 für unterschiedliche CO₂-Reduktionsziele.

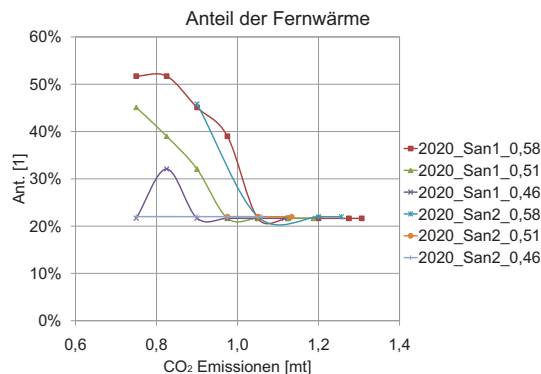


Abbildung 8.16.: Sz.: 2020. Anteil der Fernwärme am Gesamtaufkommen an Wärme für das Jahr 2020 für unterschiedliche CO₂-Reduktionsziele.

8.4. Szenarien 2030

Im Weiteren werden die Auswirkungen der veränderten Rahmenbedingungen für das Jahr 2030 untersucht.

8.4.1. 2030, San=1%, CO₂ Strom = 580 g/kWh

Folgende Szenarien zeigen die Ergebnisse der Optimierung, falls die globalen spezifischen Emissionen im Deutschen Strommix nicht reduziert werden können. Für die Szenarien wird keine Bestandskapazität für das Fernwärmenetz vorgegeben. Dennoch wird, auch ohne eine Beschränkung der CO₂-Emissionen Fernwärme im Gebiet Süd-dicht²⁴ genutzt. In dieser Region werden sowohl große als auch kleine Gebäude mit Fernwärme versorgt. Im übrigen Gebiet werden kleine Gebäude mit

²⁴kleine Region mit sehr hoher Wärmenachfragedichte; siehe Tabelle 8.1

Gas und Solarthermie, große Gebäude mit Blockheizkraftwerken und Spitzenlast Gaskesseln bzw. Solarthermie in Kombination mit Biomasseheizungen beheizt. Es wird deutlich mehr KWK Wärme und Strom in dezentralen als in zentralen Anlagen produziert. Die gesamte zur Verfügung stehende Biomasse wird für die Gebäudebeheizung eingesetzt.

Mit steigenden Reduktionszielen wird, beginnend mit den Gebieten höchster Wärmebedarfsdichte, Stück für Stück ein größeres Gebiet mit Fernwärme versorgt (Erzeugung zentraler Wärme mit den Anlagentypen GT, GeoT_HW, Gas_HW und BM aus Abbildung 8.17). Demgegenüber wird der Anteil

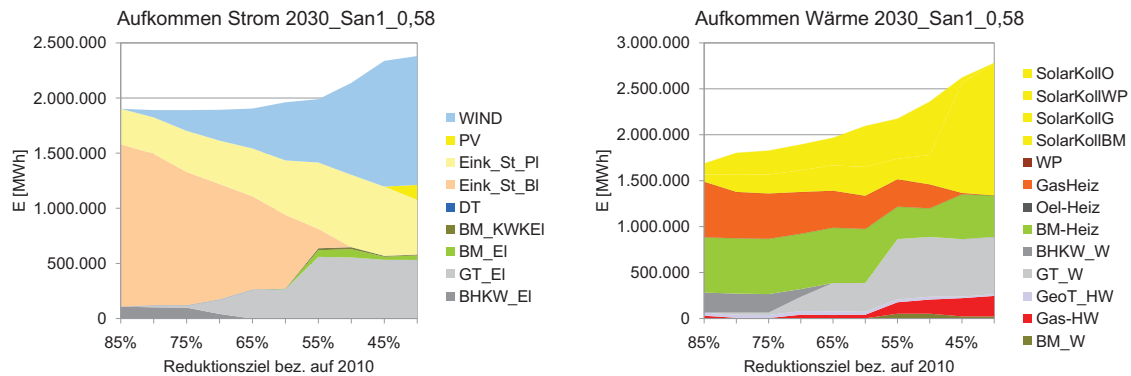


Abbildung 8.17.: Sz.: 2030 San=1% CO₂ Strom = 580 g/kWh. Aufkommen Strom (links) und Wärme (rechts) im Augsburger Stadtgebiet für steigende CO₂-Reduktionsziele.

an Wärme und Strom aus dezentraler KWK reduziert. Ebenso wird mit steigenden Reduktionszielen Biomasse teilweise zur Stromerzeugung genutzt. Wie in den Szenarien 2020 leistet Windenergie einen entscheidenden Beitrag zur Reduktion von Emissionen. Photovoltaik wird bei den angenommenen Eigenschaften²⁵ nur sehr spät eingesetzt.

In Abbildung 8.18 sind die Emissionen der Endenergieerzeugung und die anfallenden Kosten für die Vermeidung von CO₂ dargestellt.

²⁵Preise & Wirkungsgrade 2010 aber ohne EEG-Vergütung

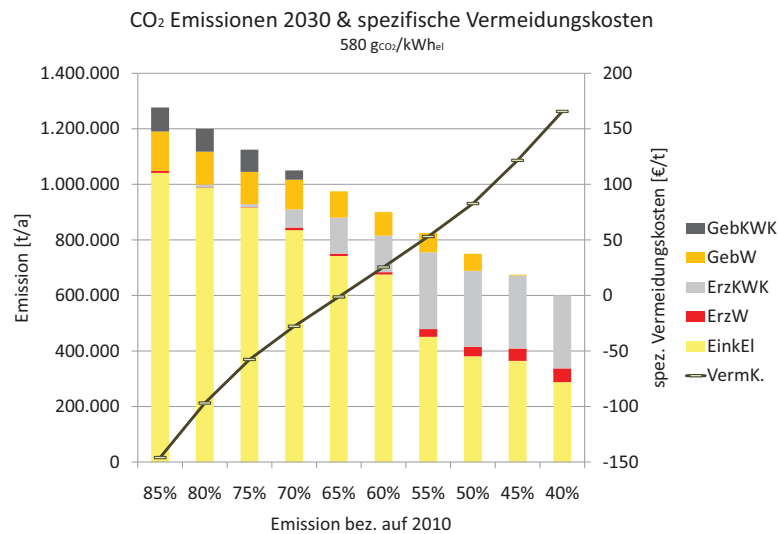


Abbildung 8.18.: CO₂-Emissionen der Energieversorgung nach Sektoren und spezifische CO₂-Vermeidungskosten bezogen auf die Gesamtkosten und Gesamtemissionen des Referenzszenarios 2010 in Abhängigkeit der Reduktionsziele.

8.4.2. 2030, San=1%, CO₂ Strom = 348 g/kWh

Ein deutlich anderes Ergebnis erhält man, wenn man die spezifischen CO₂-Emissionen im Strom auf 348 gCO₂/kWh reduziert²⁶. Für diesen Fall legt die Optimierung bei steigenden Minderungszielen ihren Schwerpunkt auf die Vermeidung von Emissionen im Wärmesektor. Dabei wird mit steigenden Zielen nahezu vollständig auf KWK-Wärme verzichtet. Die Reduktionsziele werden vornehmlich durch die Installation von Solarkollektoren erzielt. Im Stromsektor werden Reduktionsziele durch die Installation von Windkraftanlagen verwirklicht.

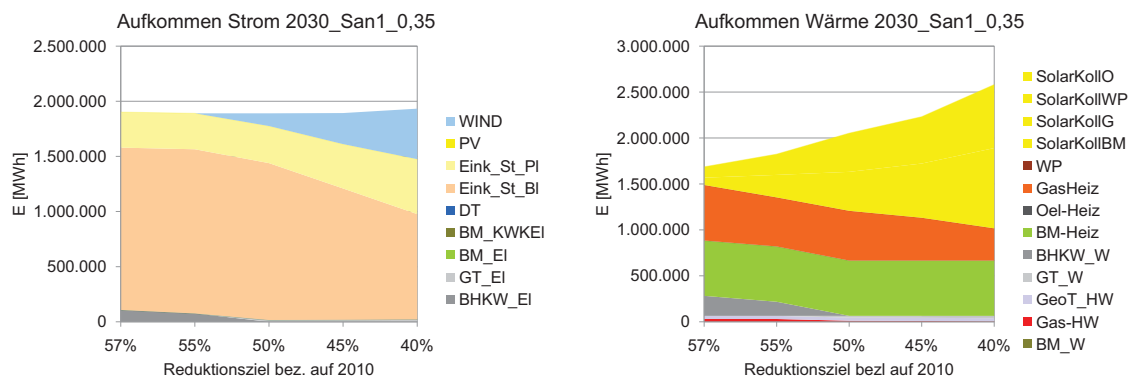


Abbildung 8.19.: Sz.: 2030 San=1% CO₂ Strom = 348 g/kWh. Aufkommen Strom (links) und Wärme (rechts) im Augsburgener Stadtgebiet für steigende CO₂-Reduktionsziele.

²⁶Reduktion auf 20% bis 2050

8.4.3. 2030, San=1%, CO₂ Strom = 580 g/kWh PV

Die Installationskosten von Windkraftanlagen, in besonderem Maße aber auch von Photovoltaikanlagen, konnten in den letzten Jahren kontinuierlich gesenkt werden. Diese Entwicklung ist von einer Reihe an Rahmenbedingungen abhängig und kann nur schwer abgeschätzt werden. Sie wurde in den bisherigen Szenarien nicht berücksichtigt. Für die folgenden Szenarien wird davon ausgegangen, dass die Installationskosten für Photovoltaikanlagen von 4500 €²⁷ bis zum Jahr 2030 auf 2000 € pro kW_P installierter Kapazität gesenkt werden können. Im Weiteren wird von spezifischen CO₂-Emissionen im Deutschen Strommix von 580 g/kWh ausgegangen.

Die Abbildungen 8.20 und 8.21 zeigen Aufkommen und Kapazitäten der Endenergieerzeugung für die unterschiedlichen Ziele.

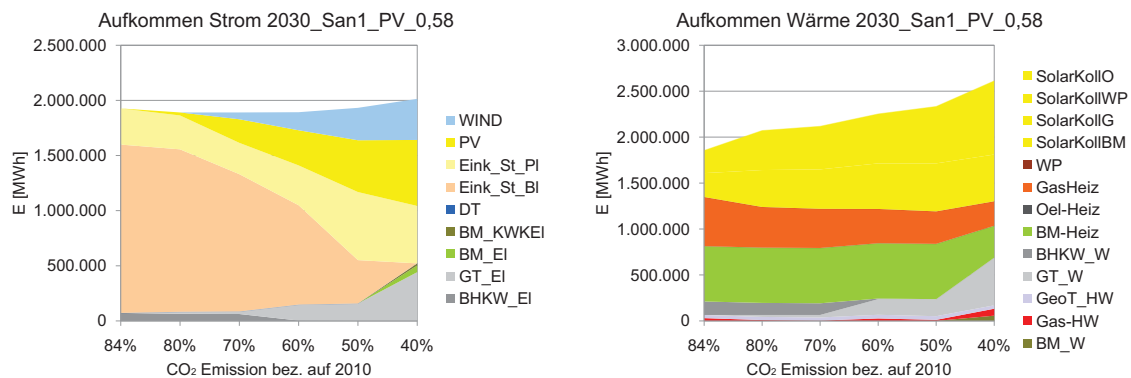


Abbildung 8.20.: Sz.: 2030 San=1% CO₂ Strom = 580 g/kWh PV. Aufkommen von Strom und Wärme im Augsburger Stadtgebiet für steigende CO₂-Reduktionsziele.

Für diese Kostenstruktur nutzt die Optimierung bereits bei deutlich geringeren Reduktionszielen Photovoltaik. Durch die Kombination von Strom aus Photovoltaik- und Windanlagen können die Nachteile dieser fluktuierenden Stromquellen stark kompensiert werden. Eine Überproduktion an Strom kann dadurch nahezu vermieden werden (vgl. Abbildung 8.17 links und 8.20 links). Im Modell wird nicht auf eine statistische Auswertung von Korrelationen zwischen Sonnen- und Winddaten zurückgegriffen. Es werden ausschließlich Zeitreihen des Jahres 2006 für Augsburg genutzt. Um eine optimale Kombination aus Solar- und Windkraftanlagen zu ermitteln zu können, müsste eine deutlich tiefgreifende Datenauswertung durchgeführt werden. Anhand der Datenlage werden Wind- und Photovoltaik-Kapazitäten in etwa in gleichem Maße ausgebaut (Abbildung 8.21).

Die Saisonalität des Photovoltaikangebots wird im Modell teilweise durch das antikorrelierte Windangebot ausgeglichen (Abbildung 8.22). Im Wesentlichen wird sie allerdings durch die Nutzung von KWK-Prozessen und durch den Zukauf von Spitzenlaststrom ausgeglichen. Es zeigt sich, dass Photovoltaik und KWK-Strom relativ gut harmonisieren. Begründet ist dies durch die negative Korrelation zwischen Sonnenangebot und Wärmenachfrage. Die Wärmenachfrage und somit das KWK-Stromangebot ist dann besonders hoch, wenn das Sonnenangebot besonders gering ist.

²⁷ Stand 2008

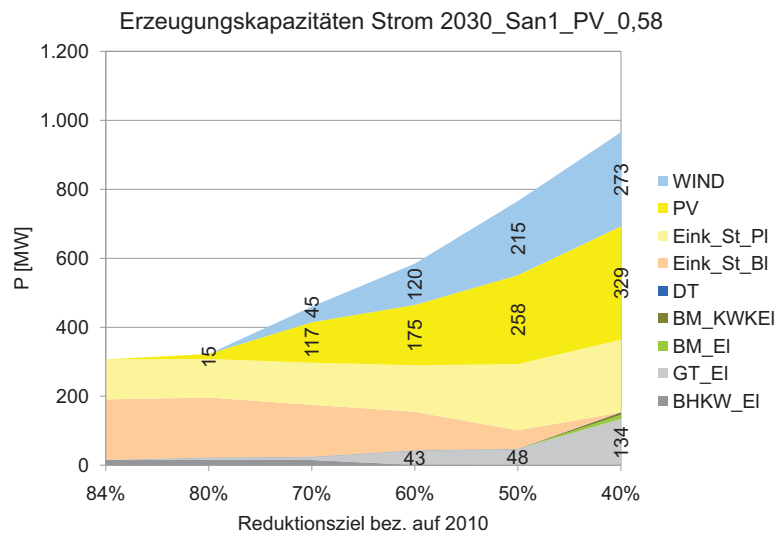


Abbildung 8.21.: Sz.: 2030 San=1% CO₂ Strom = 580 g/kWh PV. Kapazitäten zur Stromerzeugung im Augsburger Stadtgebiet für steigende CO₂-Reduktionsziele.

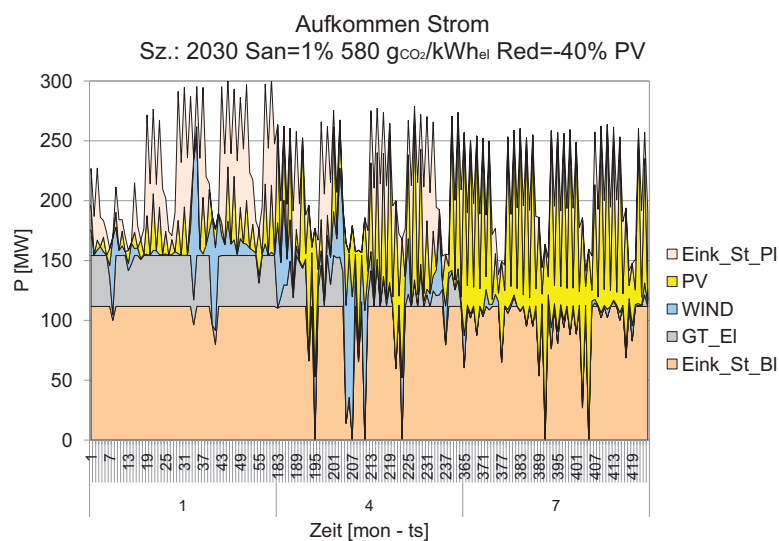


Abbildung 8.22.: Sz.: 2030 San=1% CO₂ Strom = 580 g/kWh PV Red=-40%. Lastgang der Stromerzeugung für die Monate Januar, April und Juli.

8.5. Szenarien 2050

In der vorliegenden Arbeit soll in diesem Kapitel vor allem der langfristige Umbau städtischer Energiesysteme hin zu „dekarbonisierten“ Systemen aufgezeigt werden. Als letztes Modelljahr wird hierfür das Jahr 2050 gewählt. Für dieses werden wiederum am Beispiel Augsburg die Auswirkungen unterschiedlicher Sanierungsraten und unterschiedlicher spezifischer Emissionen im Strom unter-

sucht.

Die entscheidenden Kriterien für die Optimierung²⁸ sind die Investitionskosten für die einzelnen Technologien ebenso wie die spezifischen Energiekosten. Eine belastbare Schätzung der Kostenentwicklung bis in das Jahr 2050 war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Für den Fall, dass sich sämtliche angenommenen Kosten in den Szenarien über die gesamte Zeitspanne mit der gleichen Inflationsrate entwickeln, bleibt das Verhältnis der unterschiedlichen Kosten zueinander über alle Jahre konstant. Das Verhältnis der Kosten zueinander, nicht die absolute Höhe der Kosten bestimmen die optimale Kombination aus Kapazitäten und Fahrweisen. Dementsprechend sind für diese Annahme die Ergebnisse der Optimierung belastbar, selbst bei einer Unkenntnis der allgemeinen Preisentwicklung. Dies gilt nicht, sollten sich die Kosten für unterschiedliche Technologien in unterschiedlichem Maße entwickeln. Dies konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Im weiteren wurde davon ausgegangen, dass sämtliche Kosten bis 2050 auf heutigem Niveau bleiben. Sämtliche Kosten sind dementsprechend in €₂₀₁₀ gegeben.

8.5.1. 2050, San=1%, CO₂ Strom = 580 g/kWh

Zunächst werden die Modelle für eine durchschnittliche Sanierungsrate bis 2050 von einem Prozent pro Jahr und spezifischen CO₂-Emissionen im Importstrom von 580 g/kWh betrachtet.

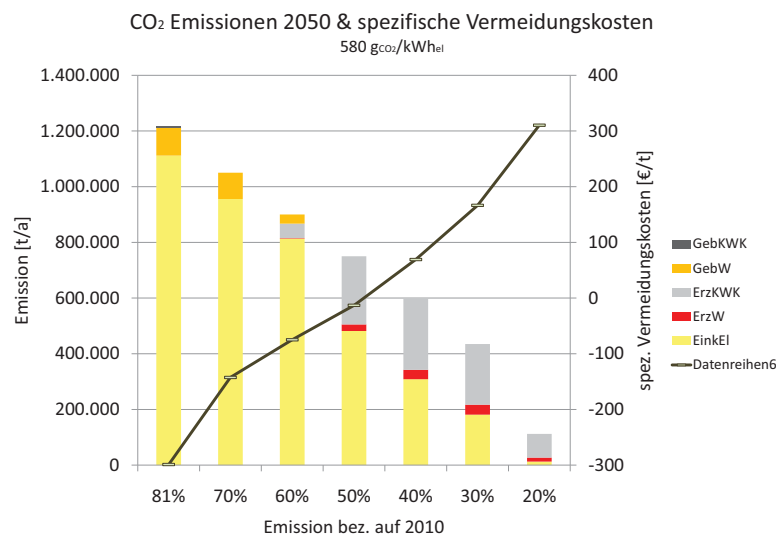


Abbildung 8.23.: CO₂-Emissionen der Energieversorgung nach Sektoren und spezifische CO₂-Vermeidungskosten bezogen auf die Gesamtkosten und Gesamtemissionen des Referenzszenarios 2010 in Abhängigkeit der Reduktionsziele.

Für die Bereitstellung der angenommenen Nachfragen ohne eine Beschränkung der CO₂-Emissionen verzichtet die Optimierung vollständig auf KWK-Prozesse und somit auch auf den Betrieb eines Fernwärmenetzes. Sämtlicher Strom wird Importiert, da Importstrom nach der gewählten Kostenstruktur

²⁸auf Grundlage der Minimierung der volkswirtschaftlichen Kosten

niedrigere spezifische Kosten als PV- und Windstrom aufweist. Die Bereitstellung der Wärme wird über Gasheizungen, Biomasseheizungen und solarthermische Anlagen realisiert. Unter diesen Rahmenbedingungen belaufen sich die Emissionen, trotz einer deutlichen Verminderung der Wärmenachfrage um 56%, auf 81% im Vergleich zum Jahr 2010.

Mit steigenden Reduktionszielen werden sowohl im Strom- als auch im Wärmesektor verstärkt erneuerbare Energiequellen genutzt. Im Stromsektor wird höheren Reduktionszielen mit einer ansteigenden Installation von Wind- und Photovoltaikkapazitäten begegnet. Im Wärmesektor steigt bei einer stärkeren Begrenzung der Emissionen die installierte Kapazität an solarthermischen Anlagen (Abbildungen 8.24 und 8.25).

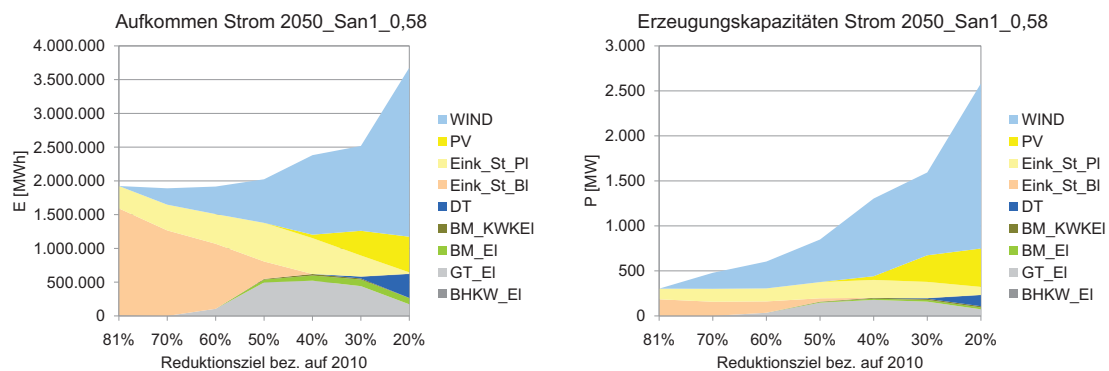


Abbildung 8.24.: Aufkommen und Kapazität Strom im Augsburger Stadtgebiet für steigende CO₂-Reduktionsziele.

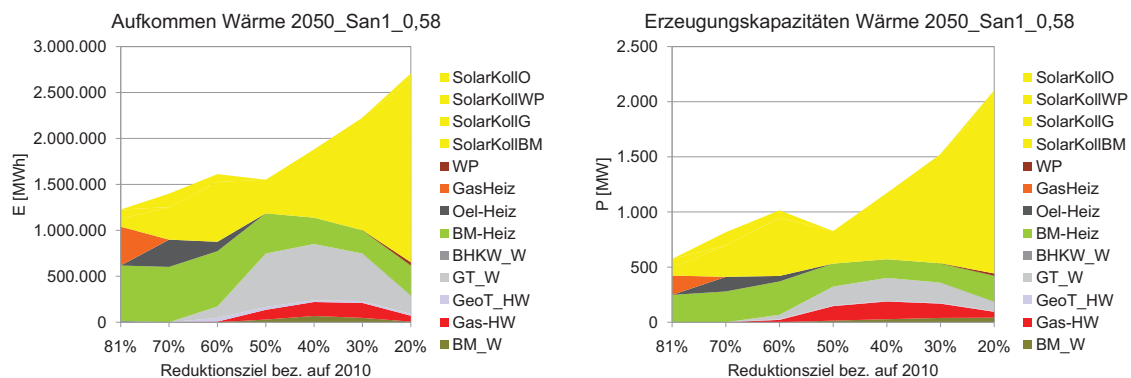


Abbildung 8.25.: Sz.: 2050 San=1% CO₂ Strom = 580 g/kWh. Aufkommen (links) und Kapazität (rechts) im Wärmesystem im Augsburger Stadtgebiet für steigende CO₂-Reduktionsziele.

Auffällig ist, dass im Fall ohne Beschränkung der Emissionen ein Gasnetz installiert wird, im Fall mit Begrenzung wird auf das Gasnetz verzichtet und dabei sogar wegfallende Gasheizungskapazitäten teilweise durch Ölheizungen ersetzt werden. Die im Modell durch den Verzicht auf das Gasnetz frei

werden volkswirtschaftlichen Kosten werden in diesem Fall effektiver für den Aufbau von Windkapazitäten genutzt.

Biomasseheizungen in Kombination mit einer kleinen solarthermischen Anlage zur Warmwasserbereitstellung sind im Modell unter den angenommenen Parametern die kostengünstigste Beheizungsvariante. Je ambitionierter die Reduktionsziele gewählt werden, desto mehr wird die Solarthermie neben der Warmwasseraufbereitung auch zur Heizungsunterstützung genutzt (Abbildung 8.26). Anreiz hier-

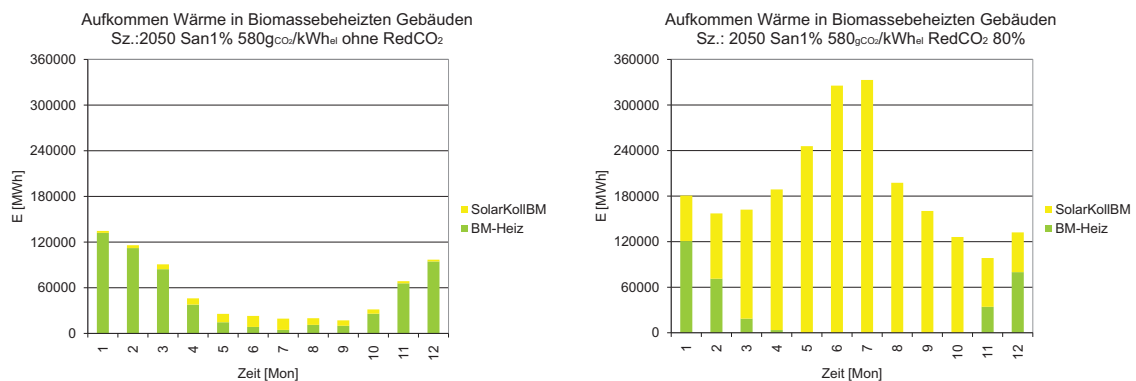


Abbildung 8.26.: Monatliches Aufkommen von Wärme für Gebäude die mit Biomasseheizkesseln und solarthermischen Anlagen ausgestattet sind. Links ohne Reduktionsziele; rechts mit einem Reduktionsziel von -80%.

für bildet für die Optimierung, dass frei werdende Biomasse aus dem Wärmesektor verstromt und somit Importstrom vermieden werden kann. Auf die Nutzung von BHKWs wird ganz verzichtet.

Die Nutzung zentral erzeugter Wärme aus Geothermie Heizwerk, Biomasse Heizkraftwerk und Gasturbine und die Verteilung via Fernwärmenetz ist in diesem Szenario durch mehrere Rahmenbedingungen begrenzt. Auf der einen Seite ist die Versorgung mit Fernwärme auf Grund der niedrigeren Wärmedichten im Stadtgebiet teurer als die dezentralen Prozesse des Referenzszenarios, auf der anderen Seite ist das Potential zur Vermeidung von CO₂-Emissionen aus fossil betriebenen KWK-Prozessen begrenzt. Bei Reduktionszielen von -50% bis -70% an Emissionen kann die Fernwärme wirtschaftlich zur Reduktion von Emissionen eingesetzt werden. Bei ambitionierteren Zielen sinkt das Potential der Fernwärme.

Die im Modell zur Verfügung stehende Biomasse wird für alle Reduktionsziele voll genutzt. Dabei steigt die Nutzung der Stromerzeugung mit steigenden Reduktionszielen solange das Biomasseheizkraftwerk mit einer hohen Auslastung betrieben werden kann. Bei sehr großen Wind- und Photovoltaikkapazitäten ist dies nicht mehr gegeben.

Bei den gegebenen Parametern ist die Wärmeversorgung mittels einer Wärmepumpe relativ teuer. Bei steigenden Reduktionszielen wird die Wärmepumpe in Kombination mit solarthermischen Anlagen in der Randzone mit geringer Wärmenachfragedichte eingesetzt.

8.5.2. 2050, San=1%, CO₂ Strom = 116 g/kWh

Gelingt es, die spezifischen CO₂-Emissionen im Importstrom in die Region auf 20% des heutigen Wertes zu drücken, weist bereits der kostenoptimale Fall eine Reduktion der Augsburger Emissionen auf 22% aus. Weitere Reduktionen werden nahezu ausschließlich im Wärmesektor realisiert (Abbildung 8.27).

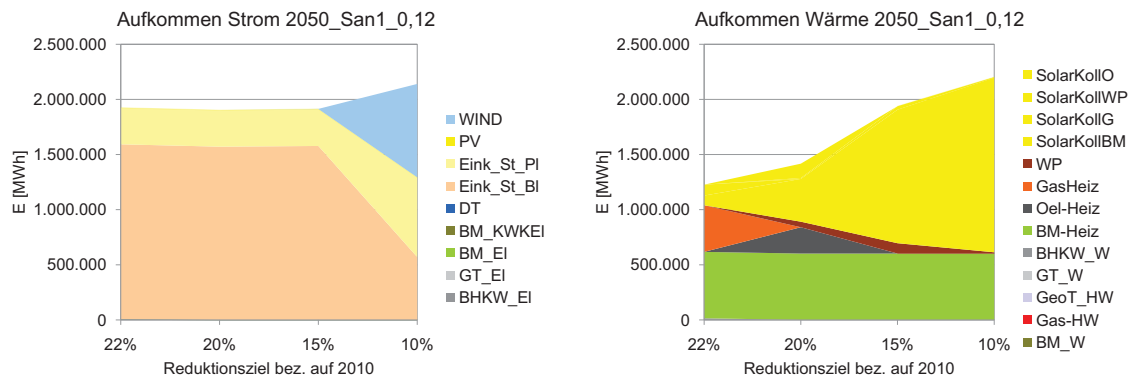


Abbildung 8.27.: Aufkommen von Strom und Wärme im Augsburger Stadtgebiet für steigende CO₂-Reduktionsziele.

Bewerkstelligt werden die höheren Reduktionsziele im Wärmemarkt zum Teil durch den Einsatz von Biomasse zur Gebäudeheizung. Darüber hinaus wird ein Teil der Wärmenachfrage in Randgebieten mit geringer Wärmenachfragedichte mittels Wärmepumpen gedeckt. Mit steigenden Reduktionszielen werden größere dezentrale solarthermische Anlagen installiert, um auch in den Übergangszeiten möglichst große Anteile der Raumwärmenachfrage bereit stellen zu können (Abbildung 8.28).

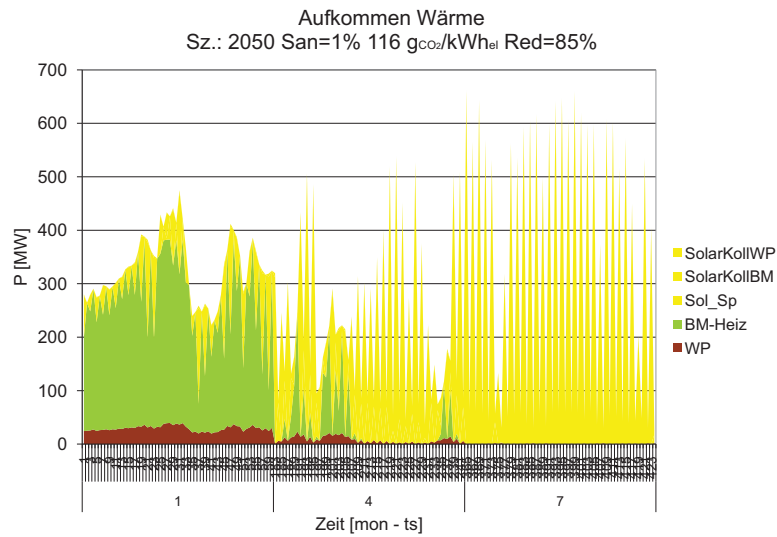


Abbildung 8.28.: Aufkommen von Wärme im Augsburger Stadtgebiet bei einer CO₂-Reduktion von 85%.

8.5.3. 2050, San=3%, CO₂ Strom = 580 g/kWh

Für den Fall, dass die Raumwärmenachfrage in Augsburg durch eine sehr hohe Sanierungsrate von durchschnittlich 3% sehr stark reduziert werden kann, ist die Möglichkeit KWK-Strom zu produzieren sehr begrenzt. Beim Reduktionsziel von -80% installiert die Optimierung eine KWK-Gasturbine mit 15,1 MW_{el} bzw. 17,7 MW_{th}. Trotz des deutlichen Anstiegs der spezifischen Transportkosten für Fernwärme wird im Stadtkern ein Fernwärmenetz betrieben.

Aufgrund der geringen Wärmenachfrage wird im Modell ein relativ großer Anteil der zur Verfügung stehenden Biomasse zur Stromproduktion eingesetzt. Daneben bilden Wind- und PV-Strom die Grundlage der Stromerzeugung (Abbildung 8.29). Im Modell wird, je nach Reduktionszwang, fehlen-

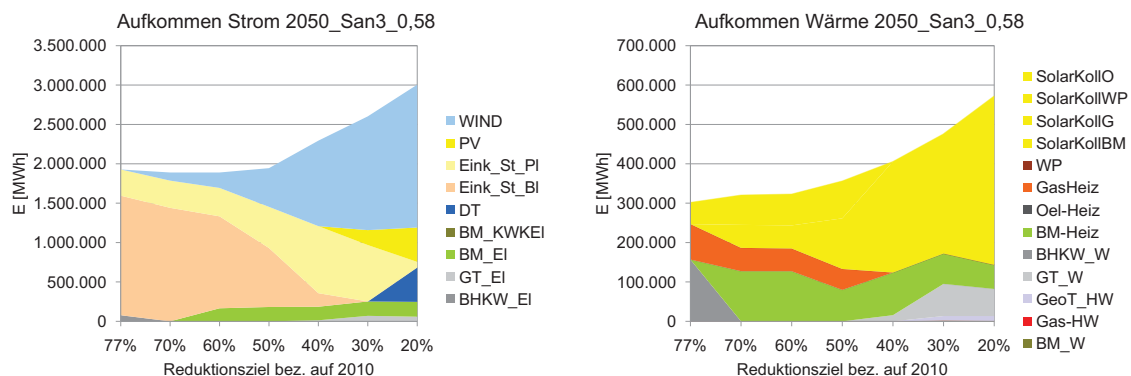


Abbildung 8.29.: Aufkommen Strom und Wärme im Augsburger Stadtgebiet für steigende CO₂-Reduktionsziele.

der Strom entweder in Form von Spitzenlaststrom eingekauft oder mittels der gasbefeuerten Dampfturbine selbst erzeugt.

8.5.4. Zusammenfassung 2050

Die zielführenden Strategien für eine deutliche Reduktion von CO₂-Emissionen im urbanen Bereich sind sehr stark von den äußeren Rahmenbedingungen abhängig. Dabei wurden die Auswirkungen zweier grundlegender Freiheitsgrade untersucht. Einerseits wird die Auswirkung unterschiedlicher Raten für energetische Gebäudesanierungen im Stadtgebiet betrachtet. Andererseits werden die Auswirkungen unterschiedlicher denkbarer Deutscher bzw. Europäischer Strategien im Strommarkt, welche die spezifischen CO₂-Emissionen des Stromimports in die Modellregion bestimmen (siehe Abschnitt 8.1), untersucht.

Für den Fall, dass es gelingt auf zentraler Ebene mit einem Projekt wie z.B. desertec (2011) die spezifischen Emissionen im Strom deutlich zu senken konzentriert die Optimierung ihre Anstrengungen zur Emissionsreduktion auf den Wärmemarkt (siehe Abbildung 8.27). Hier spielt dezentral erzeugte erneuerbare Energie aus solarthermischen- und Biomasseanlagen eine entscheidende Rolle. In den städtischen Randbezirken werden Wärmepumpen eingesetzt. Die solarthermischen Anlagen werden dabei so dimensioniert, dass sie einen möglichst großen Beitrag zur Heizungsunterstützung leisten können. Dadurch steht im Sommer eine deutliche Überkapazität zur Wärmeproduktion zur Verfügung die nicht genutzt werden kann (siehe Abbildungen 8.26 bzw. 8.28). Im Teil III dieser Arbeit soll diesbezüglich unter anderem untersucht werden, in wie weit ein Teil dieser Wärme mit Hilfe von Wärmepumpen saisonal gespeichert und zur Deckung der Wärmenachfragen im Winter beitragen können.

Die Kraft-Wärme-Kopplung wird im Fall niedriger spezifischer Emissionen im Importstrom weder dezentral, noch zentral genutzt. Es wird kein Fernwärmenetz betrieben. Der Aufbau von PV- und Windkapazitäten wird städtisch nicht bzw. nur in geringem Ausmaß voran getrieben.

Gelingt es nicht national bzw. international die Emissionen im Strom deutlich zu reduzieren, wählt die Optimierung sowohl im Wärme- als auch im Stromsektor „städtische“ Vermeidungsstrategien. Dies hat zur Folge dass regional bzw. kommunal ein möglichst hoher Anteil an Wärme und Strom aus erneuerbaren Energien gewonnen werden muss. Dadurch wird die Vielfalt der von der Optimierung genutzten lokalen Prozesse und somit die Komplexität der Energiesysteme, insbesondere des Stromsystems, erhöht.

Im Wärmesektor wird zur Vermeidung von Emissionen ein möglichst großer Anteil der Nachfrage über solarthermische Systeme erzeugt. Im Winter wird verstärkt Biomasse zur Wärmebereitstellung genutzt. Bei Reduktionszielen bis zu -70% gegenüber 2010 wird die Wärmenachfrage im Stadtkern über ein Fernwärmenetz gedeckt (siehe Abbildungen 8.25 und 8.29). Bei ambitionierteren Klimaschutzzielen reicht das Reduktionspotential der fossil befeuerten Kraft-Wärme-Kopplung nicht aus um Emissionen weiter zu senken. Dementsprechend wird für diesen Fall kein Fernwärmenetz berücksichtigt.

Tragende Säulen der Stromerzeugung stellen Windkraft- und Photovoltaikanlagen dar. Dabei wird die Kapazität der Photovoltaik so dimensioniert, dass sie tagsüber die sommerliche Stromnachfrage nahezu vollständig decken kann. Fehlender Strom wird vorwiegend durch Windenergie, mittels KWK-Gasturbine, Strom aus Biomasse oder aus der Dampfturbine erbracht. Das Angebot an Wind weist

ähnlich wie das Sonnenangebot im Jahreszyklus eine Saisonalität auf. Positiv auf eine auf Wind und Photovoltaik basierende Stromerzeugung wirkt sich die Antikorrelation zwischen Wind und Sonnenangebot aus [Grotz (2009)]. Ebenso ist auch das Stromangebot aus KWK-Prozessen im Allgemeinen antikorreliert zum Sonnenangebot. In den Modellen mit hohen Reduktionszielen wird kein Grundlaststrom bezogen und der Zukauf von Spitzenlaststrom auf ein Minimum reduziert (siehe Abbildung 8.29 links).

Die Modelle zeigen, dass Reduktionsziele und spezifische Emissionen im importierten Strommix einen deutlich stärkeren Einfluss auf die städtische Versorgungsstruktur für Wärme und Strom aufweisen als der zu erwartende Rückgang der Wärmenachfrage. Für einen städtischen Versorger zeigen die Ergebnisse der Modellszenarien zwei grundlegend verschiedene Richtungen auf. In den Szenarien mit hohen spezifischen Emissionen im Importstrom fallen städtischen Versorgern Aufgaben in der gesamten Tiefe der Wertschöpfungskette im Energiebereich zu - von der Erzeugung über die Verteilung bis hin zum Vertrieb. Standortvorteile durch die Nähe zum Kunden können ausgespielt werden. Dies gilt in besonderem Maße für den Wärme- und somit auch für den KWK-Markt.

Tritt die Entwicklung ein, dass auf sehr zentraler Ebene Emissionsminderungsstrategien dort umgesetzt werden, wo das jeweils größte energetische Potential vorhanden ist²⁹, zeichnet sich für städtische Versorger ein anderes Bild ab. In diesem Fall können die Standortvorteile im Wärmemarkt nicht auf den Strommarkt transferiert werden. Der Stromhandel tritt dann deutlich in den Vordergrund. In den Modellen wird für diesen Fall keine eigene städtische Stromerzeugung verwirklicht. Ein städtischer Versorger wäre in diesem Fall „nur“ Stromhändler.

²⁹z.B. PV in Südeuropa & Nordafrika, Windkraft an Küstenregionen, besonders an Nord- und Ostsee

Teil III.

Boden-Wärmeflussmodell

Im Teil II dieser Arbeit wurde nach optimalen Kombinationen verschiedener Technologien und Betriebsweisen gesucht um den Energiebedarf Augsburgs nachhaltig zu decken. Die Technologie der Wärmepumpe spielte in nahezu allen Szenarien eine untergeordnete Rolle. Dies resultiert aus den gewählten Rahmenbedingungen der Szenarien³⁰. Im Teil III soll nun explizit auf die Technologie der Wärmepumpe eingegangen werden. Insbesondere wird die Auswirkung des Entzugs von Wärme aus dem Boden untersucht.

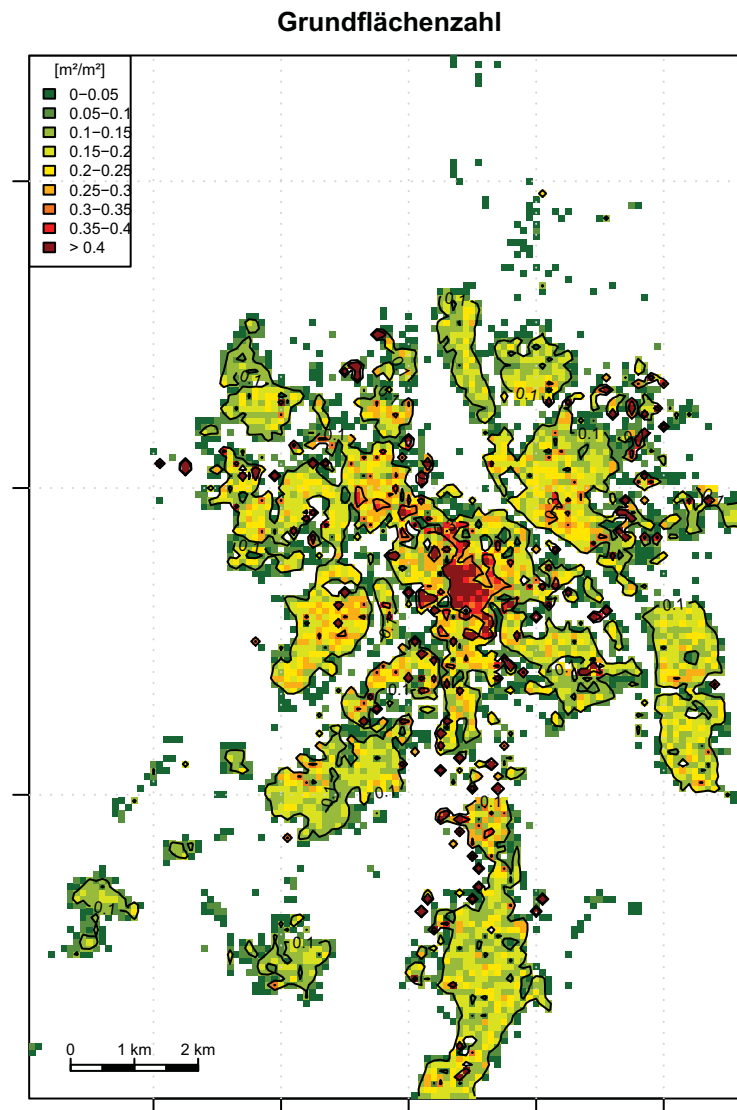


Abbildung 8.30.: Die Grundflächenzahl als Maß für die Dichte der Überbauung für das Augsburger Stadtgebiet.

Das Funktionsprinzip der Wärmepumpe ist bereits milliardenfach z.B. in Kühlschränken verwirklicht und eine relativ einfache Technologie. Weiter kann, im Gegensatz zu den meisten anderen Wärme-

³⁰Es wurden z.B. keine gesonderten, günstigeren Stromtarife beim Betrieb einer Wärmepumpen berücksichtigt wie sie häufig von Energieversorgern angeboten werden.

quellen, eine Wärmepumpe durch relativ einfache Maßnahmen sowohl zum Heizen als auch zur Kühlung verwendet werden. Somit ist die Wärmepumpe eine Technologie die sehr gut zu den kommenden „Klimaanforderungen“ passen kann.

Die Nutzung einer Wärmepumpe erfordert zwangsläufig die Nutzung von Primärenergie und Umweltwärme. Bei Wärmepumpen gibt es drei grundlegende Energiequellen für Umweltwärme; die in Luft, in Wasser³¹ oder im Erdreich gespeicherte Wärmeenergie. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Auswirkungen des Wärmeentzugs auf das Erdreich untersucht.

Abbildung 12.4 zeigt die Grundflächenzahl für das Augsburger Stadtgebiet. Die Grundflächenzahl ist ein Maß für die Dichte der überbauten Fläche. Je dichter ein Areal mit Gebäuden überbaut ist desto geringer ist die Möglichkeit des Bodens, die entzogene Wärme über die Oberfläche wieder zu regenerieren. Sollen Teile einer Stadt flächendeckend mit Wärmepumpen versorgt werden, spielt das Verhältnis von Wärmeentzug zu Regenerationspotential eine ausschlaggebende Rolle.

Im folgenden soll untersucht werden, welche Auswirkungen der Entzug von Wärme aus dem Boden durch eine Wärmepumpe hat. Insbesondere soll dabei beleuchtet werden, wie sich die Temperaturen im Boden verhalten, welchen Effekt eine etwaige Änderung der Bodentemperatur auf die Arbeitszahl der Wärmepumpe hat und wie regenerativ der Entzug der Bodenwärme ist. In einem zweiten Schritt soll aufgezeigt werden, wie weit man mit geeigneten Techniken und Rahmenbedingungen einen Teil des sommerlichen Wärmeüberschusses aus solarthermischen Anlagen (vgl. z.B. 8.29 rechts) im Boden speichern und evtl. im Winter wieder nutzbar machen kann.

Für die Bestimmung der Auswirkungen des Wärmeentzugs auf den Boden wurde ein Wärmeflussmodell programmiert. Realisiert ist die Programmierung in der Sprache VBA. Die Eingabe der Parameter für den jeweilige Simulationslauf erfolgt über das Programm Excel. Für die Verwirklichung des Modells wurde eine finite Differenzen Methode gewählt. Im Folgenden werden die Grundlagen der, für das Modell nötigen Wärmetheorie behandelt. Im Anschluss wird das Modell aufgestellt. Für die Verifikation der Korrektheit des Modells standen im Rahmen dieser Arbeit keine ausreichenden Messwerte des Wärmeflusses in Böden zur Verfügung. Dem entsprechend wurde das Modell anhand analytisch lösbarer Fälle der Wärmeausbreitung überprüft. In einem weiteren Schritt wurden die Bodenparameter für das Modell anhand der Wetterdaten [Grad (2008)] ermittelt. Im letzten Abschnitt des Teils III werden unterschiedliche Modellszenarien simuliert und ausgewertet.

³¹Oberflächen- oder Grundwasser

9. Grundlagen

Neben der Energieerhaltung, die durch den ersten Hauptsatz der Thermodynamik

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (9.1)$$

mit

ΔU Änderung der innere Energie,
 ΔQ von außen zugeführte Wärme,
 ΔW am System verrichtete Arbeit

beschrieben wird, ist das thermische Verhalten unserer Umwelt bedeutend durch den zweiten Hauptsatz bestimmt. Dieser besagt¹, dass die Entropie S in einem abgeschlossenen System nicht abnimmt und, nach [Demtröder (2006)] „ein abgeschlossenes System mit konstantem Volumen im Gleichgewicht ist, wenn seine Entropie maximal ist“. Für die Entropie gilt der Zusammenhang

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (9.2)$$

mit

S Entropie [J/K] und
 T Temperatur [K].

Diese Gesetzmäßigkeiten sorgen dafür, dass die Temperatur bestrebt ist, sich innerhalb eines abgeschlossenen Systems auszugleichen. Verschiedene Mechanismen des Wärmetransports ermöglichen diesen Ausgleich. Den Widerstand den die Transportmechanismen dem Zerfließen entgegen bringt, begrenzt die Geschwindigkeit dieser Vergleichmäßigung. Es gibt drei Mechanismen des Wärmetransports; die Wärmeleitung, die Konvektion und die Wärmestrahlung. Die Wärmeleitung beschreibt den Transport von Wärme aufgrund der Wärmeausbreitung von einem Atom/Molekül zu einem benachbarten aufgrund von direkten Stößen. Sie bildet i.A. in Festkörpern den Hauptmechanismus des Wärmetransports².

Die Wärmeleitung wird durch das Fourier'sche Gesetz

$$\vec{q}_{\text{th}} = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (9.3)$$

mit

\vec{q}_{th} Wärmestromdichte [W/m^2] und
 λ Wärmeleitfähigkeit [$\text{W K}^{-1}\text{m}^{-1}$] des Materials (materialabhängige Konstante)

beschreiben.

¹unter anderem

²abgesehen von elektromagnetischer Strahlung in nicht absorbierenden Festkörpern. Z.B. Licht durch Glas

Bei der Konvektion geht der Wärmetransport mit einem Massetransport einher. Wärme wird mit der makroskopischen Translationsbewegung der sie tragenden Masse mitbewegt. Sie ist i.A. der wichtigste Mechanismus des Wärmetransports innerhalb von Fluiden. Konvektion wird in freie und erzwungene Konvektion gruppiert. Bei der freien Konvektion ist die Änderung der Dichte eines Volumens bei Temperaturänderung für die makroskopische Translationsbewegung der, die Wärme tragenden Masse selbst verantwortlich³. Eine mathematische Beschreibung der freien Konvektion ist von unzähligen Rahmenbedingungen abhängig und komplex⁴. Eine erzwungene Konvektion ist der konvektive Wärmetransport aufgrund eines extern getriebenen Massestroms des Fluids.

Die Wärmestrahlung als dritter Transportmechanismus ist von den optischen Eigenschaften des durchstrahlten Volumens abhängig. Sie ist nicht an Masse gebunden.

Im Folgenden soll, vorwiegend für Festkörper das aus den Gesetzmäßigkeiten ableitbare Verhalten auf unterschiedliche Anfangs- und Randbedingungen für den eindimensionalen Fall erschlossen werden.

9.1. Die Wärmeleitungsgleichung

9.1.1. Wärmeleitung

In einem Festkörper fließt Wärme aufgrund eines Temperaturgefälles. Die Stärke des Flusses kann durch das Fourier'sche Gesetz (9.3) beschrieben werden. Dabei ist die Wärmestromdichte q_{th} der Grenzwert für kurze Zeitspannen der pro Zeiteinheit Δt durch ein Flächenelement ΔA fließenden Wärmemenge.

$$\vec{q}_{th} = \frac{dQ}{dt dA} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t \Delta A} \quad (9.4)$$

Der Wärmestrom $\Phi = \frac{dQ}{dt}$ aus einem Volumen ist gegeben durch das Integral über alle Wärmeströme durch die Oberfläche des Volumens

$$\Phi = - \oint \vec{q}_{th} \vec{n} dA = - \int (q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z) dA. \quad (9.5)$$

Mit Hilfe des Satzes von Gauß⁵ erhält man

$$\Phi = - \oint \vec{q}_{th} \vec{n} dA = - \int \text{div} \vec{q}_{th} dV. \quad (9.6)$$

Betrachtet man die Wärmestromdichte für einen infinitesimalen Volumen dV erhält man

$$\frac{d\Phi}{dV} = \frac{d^2 Q}{dt dV} = -\text{div} \vec{q}_{th}. \quad (9.7)$$

Mit Gleichung (9.3) ergibt sich

$$\frac{d^2 Q}{dt dV} = \text{div} \lambda \text{grad} T. \quad (9.8)$$

³z.B. Thermik

⁴siehe auch 1.1.2 & 12.1.1 bzw. [Baehr u. Stephan (2006)]

⁵Satz von Gauß: $\int_V \text{div} \vec{F} dV = \oint_A \vec{F} \vec{n} dA$ mit Vektorfeld \vec{F}

Für einen Bereich mit konstanter Wärmeleitfähigkeit ($\lambda(x, t) = \lambda$) gilt somit:

$$\frac{d^2 Q}{dt dV} = \lambda \operatorname{div} \operatorname{grad} T \quad (9.9)$$

bzw.

$$\frac{d^2 Q}{dt dV} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (9.10)$$

mit

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} = \nabla^2 = \Delta = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$$

A Fläche [m^2],

\vec{n} Flächennormale zur Fläche A ,

V Volumen [m^3].

Die Änderung des Wärmeinhalts eines Volumenelements pro Zeitschritt ist somit proportional zur 2. räumlichen Ableitung der Temperatur.

9.1.2. Wärmekapazität

Ohne die Verrichtung von Arbeit ist die Änderung der Innere Energie ΔU eines Körpers nach (9.1) durch

$$\Delta U = c m \Delta T. \quad (9.11)$$

mit

c spezifische Wärmekapazität [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] und

m Masse [kg]

bestimmt. Mit der Massendichte ρ und $m = \rho V$ gilt für ein Volumenelement ΔV

$$\frac{\Delta U}{\Delta V} = c \rho \Delta T. \quad (9.12)$$

Die Änderung des Wärmeinhalts des Volumenelements dV für einen infinitesimal kleinem Zeitschritt dt ist somit

$$\frac{d^2 U}{dt dV} = c \rho \frac{dT}{dt} \quad (9.13)$$

Die Änderung des Wärmeinhalts eines Volumenelements in diesem Zeitschritt ist proportional zur zeitlichen Änderung der Temperatur.

9.1.3. externe Energiequellen & -senken

In einem Körper kann sich die innere Energie neben dem internen Wärmefluss durch das Einbringen von externer Arbeit ΔW_{ext} bzw. Wärme ΔQ_{ext} ändern. Dieser Effekt wird beispielsweise bei einer Heizung zum Erwärmen von Gegenständen oder z.B. bei mechanischen Bremsen durch die Umwandlung von kinetischer in thermische Energie gewollt ausgenutzt. Häufig allerdings führt dieser Mechanismus zu ungewollten Wärmeverlusten, wie z.B. bei Reibungsverlusten durch eine Umwandlung von

wertvoller mechanischer in oftmals nicht genutzte Wärmeenergie. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Kollektorsystem der Wärmepumpe im Boden als externe Energiequelle / -senke bezeichnet.

9.1.4. Wärmeleitungsgleichung

Im Folgenden werden abgeschlossene Volumina ΔV betrachtet. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese keine Arbeit verrichten ($\Delta W = 0$). Die in ein Volumen eingebrachte Wärme setzt sich aus dem Wärmeaustausch mit Nachbarvolumina ΔQ_{int} und extern eingebrachter Wärme ΔQ_{ext} zusammen.

Der ersten Hauptsatz der Thermodynamik (9.1) wird dementsprechend zu

$$\frac{\Delta U}{\Delta V} = \frac{\Delta Q_{int}}{\Delta V} + \frac{\Delta Q_{ext}}{\Delta V}. \quad (9.14)$$

Für konstante Stoffeigenschaften für ρ , c und λ ergibt sich die Wärmeleitungsgleichung

$$c \rho \frac{dT}{dt} = \lambda \operatorname{div} \operatorname{grad} T + \frac{d\dot{Q}_{ext}}{dV} \quad (9.15)$$

bzw.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_T \nabla^2 T + \frac{1}{c \rho} \frac{d\dot{Q}_{ext}}{dV} \quad (9.16)$$

mit

$$\lambda_T = \frac{\lambda}{c \rho}. \quad (9.17)$$

λ_T wird als Temperaturleitfähigkeit [m^2s^{-1}] definiert.

Für den Fall ohne externe Wärmequellen bzw. -senken vereinfacht sich Gleichung (9.16) zu:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_T \nabla^2 T \quad (9.18)$$

Im Folgenden wird die Differentialgleichung im 1 dimensionalen Fall betrachtet.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (9.19)$$

Gleichung (9.19) ist eine partielle Differenzialgleichung 2. Ordnung (Parabolische Differentialgleichung). Die Temperatur T im Volumen ist somit eine Funktion der Zeit t sowie des Ortes x ; $T(x, t)$.

9.2. Lösung der Wärmeleitungsgleichung

Im Folgenden werden in Anlehnung an [Davies (1995)] vier Klassen analytischer Lösungen betrachtet:

1. Die stationäre Lösung mit $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$.
2. Lösungen mit t und x als Produkt.

3. Periodische Lösung.
4. Lösung für einen Temperaturimpuls.

9.2.1. stationäre Lösung:

Für den stationären Fall $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ gilt:

$$0 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} T \quad (9.20)$$

Gleichung (9.20) ist eine Laplace'sche Differentialgleichung. Sie wird durch die Funktion

$$T(x, t) = T_0 + \beta_x x \quad (9.21)$$

mit

T_0 Anfangsbedingung $T_0 = T(x = 0, t = 0)$ [K] und
 β_x konstanter Temperaturgradient [K/m]

erfüllt.

Dementsprechend ergibt sich mit dem Fourier'schen Gesetz (9.3) eine zeitlich konstante Wärmestromdichte $\vec{q}_{th} = -\lambda \beta_x$ durch jede Schichtebene des Volumens. Besteht das Volumen aus mehreren Schichten i mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften so gilt im stationären Fall, also im thermischen Gleichgewicht

$$\vec{q}_i = \text{konst.} \quad \forall i. \quad (9.22)$$

Für den senkrechten Wärmefluss durch eine Wand gilt somit für jede Schicht der Wand

$$q_i = \lambda_i \frac{\Delta T_i}{X_i} \quad (9.23)$$

mit

ΔT_i Temperaturdifferenz zwischen den Randzonen der Schicht i [K] und
 X_i Schichtdicke der Schicht i [m].

Innerhalb einer Schicht konstanter Materialeigenschaften ergibt sich im Gleichgewicht ein linearer Temperaturverlauf. An den Schichtgrenzen ist der Temperaturverlauf stetig aber nicht (zwangsläufig) differenzierbar. Die Temperatur T_N am Ende der letzten Schicht kann somit durch

$$T_N = T_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i \cdot X_i \quad (9.24)$$

beschrieben werden. Dabei ergibt sich die Steigung β_i aus

$$\beta_i = \frac{\Delta T_i}{X_i}. \quad (9.25)$$

Aus dem eindimensionalen Fall des Fourier'schen Gesetz (9.3) erhält man

$$\frac{\Delta T_i}{X_i} = \frac{q_i}{\lambda_i}. \quad (9.26)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (9.25) und (9.26) in Gleichung (9.24) ergibt sich

$$T_N = T_0 + \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{\lambda_i} \cdot X_i. \quad (9.27)$$

Mit der Bedingung (9.22) ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz zwischen den Randzonen einer betrachteten Wand $T_N - T_0$, der Wärmestromdichte q und den thermischen Eigenschaften der einzelnen Schichten der Wand X_i und λ_i

$$\frac{T_N - T_0}{q} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{\lambda_i}. \quad (9.28)$$

Durch $\frac{X_i}{\lambda_i}$ ist der Wärmeleitwiderstand R_i der Schichten gegeben, durch $\frac{T_N - T_0}{q}$ der gesamte Wärmeleitwiderstand R des Aufbaus aus allen Schichten. Aus Gleichung (9.28) zeigt sich, dass sich Widerstände hintereinander liegender Schichten zum Gesamtwiderstand aufsummieren⁶:

$$R = \sum_{i=1}^N R_i. \quad (9.29)$$

mit

R Wärmeleitwiderstand [$\text{K m}^2 / \text{W}$].

9.2.2. Lösung mit t und x als Produkt

Der folgende Abschnitt gibt kurz den in [Davies (1995)] beschriebenen Fall von Lösungen in denen x und t als Produkt erscheinen wieder. Die Gleichungen

$$T(x, t) = C(x^2 + 2\kappa t) \quad (9.30)$$

$$T(x, t) = D(x^3 + 6\kappa x t) \quad (9.31)$$

$$T(x, t) = E(x^4 + 12\kappa x^2 t + 12\kappa^2 t^2) \quad (9.32)$$

$$T(x, t) = F(x^5 + 20\kappa x^3 t + 60\kappa^2 x t^2) \quad (9.33)$$

mit den Konstanten C , D , E und F sind Lösungen der Wärmeleitungsgleichung (9.18). Die sich ergebenden Temperaturverteilungen stellen Sonderfälle der Wärmeleitung dar. Gleichung (9.30) beschreibt das Temperaturfeld in einer Schicht der Dicke X bei dem ein Ende (bei $x = 0$) adiabatisch ist, das andere Ende (bei $x = X$) mit einem konstanten Wärmefluss beaufschlagt wird.

Die weiteren Lösungen beschreiben weitere Sonderfälle die im Rahmen dieser Arbeit nicht ausführlicher diskutiert werden⁷.

⁶vergleiche Gleichung (1.4) aus Kapitel 1.1.2

⁷Eine ausführlichere Beschreibung dieser Sonderfälle sind in [Davies (1995)] Abschnitt 4. aufgezeigt.

9.2.3. periodische Rahmenbedingungen

Geht man davon aus, dass es eine Lösung von Gleichung (9.19) gibt, in der x und t unabhängig voneinander vorkommen kann man folgenden Ansatz wählen:

$$T(x, t) = T_0 + \Psi(t) \cdot \Phi(x) \quad (9.34)$$

T_0 ist dabei die mittlere Temperatur des gesamten betrachteten Volumens. Für die folgenden Berechnungen kann die zu Grunde gelegte Temperaturskala so gewählt werden, dass $T_0 = 0$ gilt. Daraus folgt für Gleichung (9.19)

$$\frac{\Psi'(t)}{\Psi(t)} = \lambda_T \frac{\Phi''(x)}{\Phi(x)}. \quad (9.35)$$

Da beide Seiten bei Variation von x bzw. t voneinander unabhängig sind gilt

$$\frac{\Psi'(t)}{\Psi(t)} = \alpha = \lambda_T \frac{\Phi''(x)}{\Phi(x)} \quad (9.36)$$

Weiter folgt

$$\Psi'(t) = \alpha \Psi(t) \quad (9.37)$$

und

$$\Phi''(x) = \frac{\alpha}{\lambda_T} \Phi(x). \quad (9.38)$$

Aus (9.37) ergibt sich

$$\Psi(t) = A \exp \{\alpha t\}. \quad (9.39)$$

Aus (9.38)

$$\Phi(x) = B \exp \left\{ \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_T}} x \right\} + C \exp \left\{ -\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_T}} x \right\} \quad (9.40)$$

Somit gilt für die Temperatur

$$T(x, t) = \exp \{\alpha t\} \left(A \exp \left\{ \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_T}} x \right\} + B \exp \left\{ -\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_T}} x \right\} \right) \quad (9.41)$$

bzw.

$$T(x, t) = \exp \{\alpha t\} \left(A' \sinh \left(\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_T}} x \right) + B' \cosh \left(\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_T}} x \right) \right). \quad (9.42)$$

Aus dem Term $\exp \{\alpha t\}$ aus Gleichung (9.41) folgt, dass α die Einheit $\frac{1}{s}$ haben muss. Physikalisch sinnvolle Lösungen erhält man für einen Zeitverlauf in positiver Richtung nur für $\alpha < 0$ ⁸. Es lassen sich zwei Fälle unterscheiden.

Fall 1: Für $\alpha = -\frac{1}{z}$ (mit z reell & $[z] = s$) gilt

$$T(x, t) = \exp \left\{ -\frac{t}{z} \right\} \left(A \exp \left\{ i \sqrt{\frac{1}{z \lambda_T}} x \right\} + B \exp \left\{ -i \sqrt{\frac{1}{z \lambda_T}} x \right\} \right) \quad (9.43)$$

⁸2. Hauptsatz der Thermodynamik.

bzw.

$$T(x, t) = \exp \left\{ -\frac{t}{z} \right\} \left(A' \cos \left(\sqrt{\frac{1}{z\lambda_T}} x \right) + B' \sin \left(\sqrt{\frac{1}{z\lambda_T}} x \right) \right) \quad (9.44)$$

Es zeigt sich, dass eine anfängliche Temperaturverteilung, die durch im Raum periodische Funktionen mit der Wellenlänge

$$\Lambda_n = 2\pi \sqrt{z_n \lambda_T} \quad (9.45)$$

beschrieben werden kann in sich selbst zerfließt.

Fall 2: α hat im Fall 1 mit $= \frac{1}{s}$ die Einheit einer Frequenz. Geht man von einer in der Zeit periodischen Randbedingung mit der Periodendauer P aus, kann man $\alpha := 2\pi/P$ mit $\Re(P') = 0$ und $\Im(P') = P$ definieren⁹. Dadurch ergibt sich aus Gleichung (9.41)¹⁰

$$T(x, t) = \exp \{ i 2\pi t / P \} \left(A \exp \left\{ (1+i) \sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}} x \right\} + B \exp \left\{ -(1+i) \sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}} x \right\} \right) \quad (9.46)$$

bzw. aus Gleichung (9.42)

$$T(x, t) = \exp \{ i 2\pi t / P \} \left(A' \sinh \left\{ (1+i) \sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}} x \right\} + B' \cosh \left\{ (1+i) \sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}} x \right\} \right). \quad (9.47)$$

Sowohl der Temperaturverlauf im Tag- Nachtrhythmus als auch im saisonalen Jahresverlauf kann in einfacher Näherung durch eine, in der Zeit periodische Randbedingung beschrieben werden.

Anhand der beiden Gleichungen (9.46) und (9.47) werden im Folgenden für zwei Fälle Auswirkungen dieser periodischen Anregung gezeigt.

halbunendlicher Körper: Die Reaktion eines halbunendlichen Körpers mit der Ausdehnung in x -Richtung $0 < x < \infty$ unter der zeitlich periodischen Randbedingung an der Oberfläche ($x = 0$)

$$T(0, t) = T_0 \exp \left\{ i \frac{2\pi t}{P} \right\} \quad (9.48)$$

ist durch die Gleichung

$$T(x, t) = T_0 \exp \left\{ -\sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}} x \right\} \exp \left\{ i 2\pi \left[\frac{t}{P} - \frac{x}{\Lambda} \right] \right\} \quad (9.49)$$

mit

$$\begin{array}{ll} P & \text{Periodendauer und} \\ \Lambda = \sqrt{4\pi\lambda_T P} & \text{Wellenlänge} \end{array}$$

gegeben. Der Term $\exp \left\{ i 2\pi \left[\frac{t}{P} - \frac{x}{\Lambda} \right] \right\}$ beschreibt eine sowohl in der Zeit (mit Periodendauer P) als auch im Raum (mit Wellenlänge Λ) periodische Reaktion auf die Anregung. Durch den Term

⁹ mit \Re als Realteil und \Im als Imaginärteil.

¹⁰ Detailliertere Herleitung im Anhang in Kapitel 12.3.1

$T_0 \exp \left\{ -\sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}} x \right\}$ ist eine Einhüllende definiert, die exponentiell mit $-x$ abfällt und die Eindringtiefe der Reaktion beschreibt.

Zur Beschreibung der Reaktion des Bodens auf den täglich und saisonal variierenden Wärmefluss über die Oberfläche kann das Erdreich als halbumendlicher Körper betrachtet werden. Die thermische Wechselwirkung des Bodens mit der Umgebung kann in einfachster Form durch periodische Anregungen der Grenzschicht mit der Periodendauer $P = 24$ h bezüglich des Tag-/Nachtrhythmus bzw. $P = 365$ d bezüglich des Jahreszyklus beschrieben werden. Abbildung 9.1 zeigt den Temperatur-

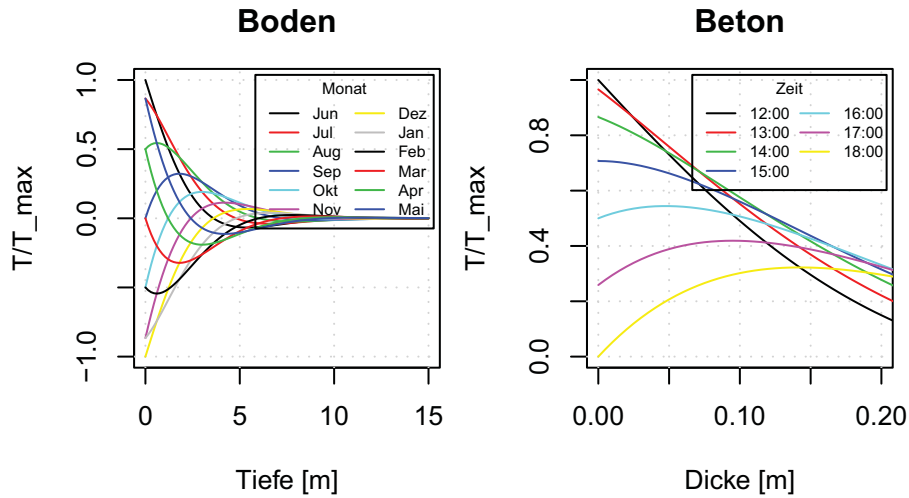


Abbildung 9.1.: Links: Temperaturverlauf im Erdreich mit $P = 365$ d (saisonale Temperaturschwankungen); rechts: Temperaturverlauf in Beton bei $P = 24$ h (tägliche Temperaturschwankungen).

verlauf im Erdreich bzw. in einem Körper aus Beton in Abhängigkeit der Eindringtiefe x . Für typische Bodenparameter¹¹ ergibt sich für eine saisonale Schwankung die Wellenlänge Λ zu 14,4 m¹². Dementsprechend ist in einer Bodentiefe von 7,2 m der Temperaturverlauf gegenüber dem Temperaturverlauf der Umgebungsluft um π , also um ein halbes Jahr Phasenverschoben. Hier ist die Temperatur im Winter am größten und im Sommer am geringsten. Die Amplitude der Temperaturschwankung ist in dieser Tiefe bereits auf 0,04 T_0 reduziert. In einer Tiefe von 1,2 m¹³ beträgt die Amplitude noch ca. 0,6 T_0 . Die zeitliche Verzögerung in dieser Tiefe beträgt ca. einen Monat (Abbildung 9.1).

Die charakteristische Admittanz \mathbf{a} eines Körpers ist das Verhältnis zwischen dem Wärmestrom durch die Oberfläche in den Körper und der Temperatur an der Oberfläche bei periodischer Anregung. Sie hat die Einheit $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Nach [Davies (1994)]¹⁴ bzw. [Davies (1995)] ist sie definiert als¹⁵

$$\mathbf{a} \equiv \frac{q(0, t)}{T(0, t)} = \sqrt{\frac{2\pi\lambda\rho c}{P}} \exp \left\{ i \frac{\pi}{4} \right\}. \quad (9.50)$$

¹¹ $c=1250 \text{ J/kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho=1800 \text{ kg m}^{-3}$ & $\lambda = 1.18 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1} \Rightarrow \lambda_T = 524 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}$

¹² siehe Anhang 12.3.2

¹³ typische Tiefe von Wärmekollektoren für Wärmepumpen

¹⁴ Abschnitt 2. The Semi-Infinite Solid

¹⁵ Herleitung 12.3.3

Es zeigt sich nach Gleichung (9.50) dass die Admittanz eines halbumendlichen Körpers eine konstante Phasenverschiebung zwischen Temperatur T und Wärmestrom q um $\pi/4$ aufweist. Bei einer Periodendauer von $P = 24$ h eilt die Phase des Wärmestroms der Phase der Temperatur um 3 h voraus. Der Betrag der Admittanz $a = \sqrt{\frac{2\pi\lambda\rho c}{P}}$ ist stark von den Materialeigenschaften des Körpers abhängig¹⁶.

Für eine Schicht endlicher Dicke mit $0 < x < X$ gilt nach [Davies (1994)] für eine periodische Anregung bei $x = 0$ nach Gleichung (9.48) für den Zusammenhang der Amplituden der Temperaturen T_0 und T_X an den Schichtgrenzen

$$T_X = \cosh(\tau + i\tau) \cdot T_0 + \sinh(\tau + i\tau)/\mathbf{a} \cdot q_0 \quad (9.51)$$

mit der dimensionslosen, periodischen Dicke der Schicht

$$\tau = \sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}} X \quad (9.52)$$

und der charakteristischen Admittanz \mathbf{a} aus Gleichung (9.50). Dabei kann man nach [Davies (1994)] Schichten mit $\tau \leq 0,1$ als dünn, Schichten mit $\tau \geq 3$ als dick bezeichnen. Dünn bedeutet hier, dass nur geringe Temperaturunterschiede innerhalb der Wand zu beobachten sind.

Für den Wärmestrom durch die Schichtgrenzen erhält man

$$q_X = \sinh(\tau + i\tau) \cdot \mathbf{a} \cdot T_0 + \cosh(\tau + i\tau) \cdot q_0. \quad (9.53)$$

Die Gleichungen (9.51) und (9.53) können wie folgt in Matrixschreibweise zusammen gefasst werden:

$$\begin{pmatrix} T_X \\ q_X \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} T_0 \\ q_0 \end{pmatrix} \quad (9.54)$$

mit

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \cosh(\tau + i\tau) & \sinh(\tau + i\tau)/\mathbf{a} \\ \sinh(\tau + i\tau) \cdot \mathbf{a} & \cosh(\tau + i\tau) \end{pmatrix}. \quad (9.55)$$

Besteht eine Wand aus mehreren Schichten¹⁷ wird Gleichung (9.54) zu

$$\begin{pmatrix} T_X \\ q_X \end{pmatrix} = \bar{\mathbf{M}} \begin{pmatrix} T_0 \\ q_0 \end{pmatrix} \quad (9.56)$$

mit

$$\bar{\mathbf{M}} = \prod_i \bar{\mathbf{M}}_i, \quad (9.57)$$

¹⁶Dies ist dadurch begründet, dass im Allgemeinen Materialien mit hoher Dichte c auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit λ besitzen. Dieser Zusammenhang sorgt dafür, dass sich die thermische Leitfähigkeit $\lambda_T = \lambda/(\rho c)$ zwischen verschiedenen Materialien nur relativ gering unterscheidet. Für die Größe der Admittanz hingegen ergibt sich hieraus eine sehr starke Variation zwischen unterschiedlichen Materialien aufgrund der Abhängigkeit von $\lambda\rho c$.

¹⁷Dies ist automatisch der Fall betrachtet man den Übergang Umgebungsluft - Wand und Wand - Innenluft mit

den Matrizen \bar{M}_i für jede Schicht i

$$\bar{M}_i = \begin{pmatrix} \cosh(\tau_i + i\tau_i) & \sinh(\tau_i + i\tau_i)/\mathbf{a}_i \\ \sinh(\tau_i + i\tau_i) \cdot \mathbf{a}_i & \cosh(\tau_i + i\tau_i) \end{pmatrix} \quad (9.58)$$

und $\prod_i \bar{M}_i$ als Matrixmultiplikation. Bei der Matrixmultiplikation ist auf die korrekte Abfolge der Schichten zu achten.

Für den Wärmeübergang zwischen Luft und Oberfläche mit dem konstanten Wärmeübergangswiderstand $R_{\text{Oberf}} = \alpha_{\text{Oberf}}^{-1}$ gilt

$$\bar{M}_{\text{Oberf}} = \begin{pmatrix} 1 & R_{\text{Oberf}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (9.59)$$

Der Zusammenhang zwischen den Temperaturen und Wärmeflüssen an den Enden der Wand kann mit der Matrix \bar{M} wiederum aus Gleichung (9.56) beschrieben werden. Anhand der Matrix können drei wichtige Parameter der Wand bestimmt werden. Die Admittanz der beiden Oberflächen \mathbf{a}_0 und \mathbf{a}_X und die Transmittanz \mathbf{u} durch die Wand.

$$\mathbf{a}_X = \frac{\bar{M}_{2,2}}{\bar{M}_{1,2}} \quad (9.60)$$

$$\mathbf{a}_0 = -\frac{\bar{M}_{1,1}}{\bar{M}_{1,2}} \quad (9.61)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{\bar{M}_{1,2}} \quad (9.62)$$

bzw. der dekrement Faktor

$$\mathbf{u}' = \frac{\mathbf{u}}{U} \quad (9.63)$$

Sowohl die Admittanz als auch die Transmittanz sind komplex. Sie können somit durch deren Länge und Phasenverschiebung beschrieben werden. Die Größe der Admittanz $|a|$ ist das Maß für die maximale Aufnahmefähigkeit der Oberfläche. Die Einheit ist $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ und somit identisch mit der Einheit des U -Werts. Aufgrund der periodischen Randbedingungen an den Oberflächen wandert ein Teil der von einer Wand aufgenommenen Wärme nicht durch den Körper, sondern wird an der selben Oberflächenseite wieder abgegeben. Die Transmittanz trägt diesem Vorgang Rechnung. Die Einheit der Transmittanz ist ebenfalls $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Sie ist stets kleiner als der U -Wert der Wand. Die Transmittanz \mathbf{u} gibt dabei das komplexe Verhältnis von Wärmefluss durch die Wand zur Temperatur an der Oberfläche an.

$$\mathbf{u} = \frac{q_X}{T_0} \quad (9.64)$$

\mathbf{u} kann in Polarkoordinaten durch den Betrag $|\mathbf{u}|$ und deren Winkel angegeben werden. Der Auslenkungswinkel im Verhältnis zur Periodendauer gibt die Phasenverschiebung Δt .

Im Folgenden sollen für unterschiedliche Wandaufbauten beispielhaft diese Werte diskutiert werden. Dafür werden die Wandaufbauten für je eine

- verputzte Betonwand (BW),
- verputzte und von außen isolierte Betonwand (DBW),
- Einfachverglasung (F20) und

- Isolierverglasung dreifach (IF)

betrachtet. Die Materialeigenschaften der einzelnen Schichten sind in Tabelle 9.1, die Materialeigenschaften der Wandaufbauten aus mehreren Schichten in Tabelle 9.2 zusammengefasst.

| Material | Dicke m | $ a $ $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ | τ - | $ u' $ % | $\Delta t_{u'}$ h |
|----------|------------|---|-------------|-------------|----------------------|
| Beton | 0,200 | 16,38 | 1,10 | 97 | -1,5 |
| Dämmung | 0,200 | 0,59 | 2,72 | 51 | -19,39 |
| Putz | 0,013 | 6,88 | 0,13 | 100 | -0,02 |
| Glas | 0,020 | 10,51 | 0,20 | 100 | -0,05 |
| Glas | 0,012 | 10,51 | 0,12 | 100 | -0,02 |
| Luft | 0,010 | 0,01 | 0,003 | 100 | -0,00 |

Tabelle 9.1.: Thermische Eigenschaften der Schichten

| Material | U $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ | $ u $ $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ | $ u' $ % | $\Delta t_{u'}$ h |
|----------|---------------------------------------|---|-------------|----------------------|
| BW | 3,15 | 1,67 | 53 | -5,3 |
| DBW | 0,14 | 0,01 | 10 | -26,5 |
| F20 | 5,09 | 5,07 | 100 | -0,4 |
| IF | 0,67 | 0,54 | 81 | -3,3 |

Tabelle 9.2.: Thermische Eigenschaften der Wände

$\Delta t_{u'}$ gibt die Phasenverschiebung für periodische Rahmenbedingungen mit $P = 24$ h zwischen maximaler Temperatur T_0 an der äußeren Oberfläche ($x = 0$) und dem maximalen Wärmestrom durch die innere Oberfläche q_X in Stunden an. Es kommt teilweise zu einer deutlichen Verzögerung des Wärmeflusses durch die Wandaufbauten. Bei gut gedämmten Wänden um über einen Tag. Bei den beiden Fenstervarianten ergeben die Transmissivitäten deutlich geringere Zeitverzögerungen. Zu beachten ist hier, dass rein der Wärmeübertrag aufgrund von Wärmeleitung betrachtet wurde. Bei Fenstern spielt der Wärmeübertrag durch Wärmestrahlung (und Licht) eine starke Rolle. Dies wird an anderer Stelle betrachtet. Der Dekrementfaktor u sinkt im allgemeinen mit der Dicke τ der Wand. Für die gedämmte Betonwand reduziert der Dekrementfaktor den U -Wert des Gebäudes auf 10% aufgrund der periodischen Rahmenbedingungen.

Sowohl die Phasenverschiebung als auch der Dekrementfaktor führt dazu, dass Gebäudehüllen unter der Annahme einer periodischen Temperaturfluktuation nicht korrekt alleine durch Wärmeleitwert U bzw. den thermischen Widerstand R beschrieben werden können. In den meisten Modellrechnungen zur Bestimmung des Raumwärmebedarfs wird allerdings diese einfache Methode verwandt [Larsen u. a. (2009)]. Auch in Kapitel I dieser Arbeit wird eine Reduktion von Wärmeleitwerten aufgrund näherungsweise periodischen Rahmenbedingungen nicht berücksichtigt.

9.2.4. Temperaturpuls

Eine weitere (fundamentale) Lösung der Wärmeleitungsgleichung ist durch

$$T(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\lambda_T t}} \exp\left\{-\frac{x^2}{4\lambda_T t}\right\} \quad (9.65)$$

gegeben. Gleichung (9.65) beschreibt die Antwort eines unendlich langen eindimensionalen Systems auf einen Wärmepuls bei $t = 0$ und $x = 0$. Der Wärmeimpuls im Zentrum des Volumens ist durch den Exponentialteil von Gleichung (9.65) bestimmt. Er hat die Form einer Gauß-Glocke. Aus der Energieerhaltung folgt der Vorfaktor. In Abbildung 9.2 ist der zeitliche Verlauf des Wärmepuls zu sehen.

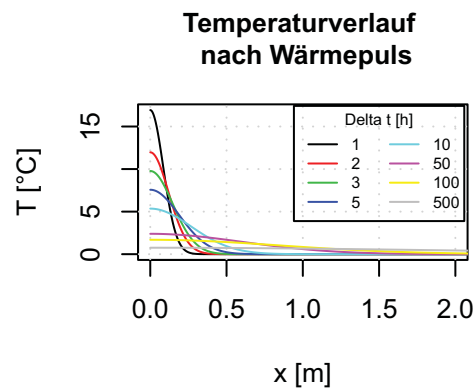


Abbildung 9.2.: Reaktion der Temperaturen auf eine kurzzeitige Anregung am Ort $x=0$. Der Verlauf ist symmetrisch um $x = 0$. Dargestellt ist nur die Ausbreitung in positive x -Richtung.

9.3. Diskretisierung

Mit dem Wärmeflussmodell soll geklärt werden, welche Einflüsse die Nutzung von Wärmepumpen zur Bereitstellung von Raumwärme auf die Böden hat. Im weiteren wird untersucht in wie weit diese Einflüsse auf den Prozess Wärmepumpe rückkoppeln¹⁸.

Es gibt mehrere Verfahren zur numerischen Berechnung und der Simulation von Wärmeflüssen innerhalb eines betrachteten Volumens und einer bestimmten Zeitspanne. Komplexe Systeme werden im Allgemeinen mittels der finite-Elemente-Methode bestimmt, einfachere Systeme, z.B. Probleme mit einer einfachen Geometrie können mit der mathematisch einfacheren finite-Differenzen-Methode genähert werden. Im Betrachteten Fall wurde zur Beschreibung des Wärmeflusses die explizite finite-Differenzen Methode angewandt. Bei diesem Verfahren berechnen sich die Eigenschaften eines betrachteten Volumenelements zum Zeitpunkt $t_0 + \Delta t$ aus den Anfangsbedingungen bei $t = t_0$ des Volumenelements und seiner direkten Nachbarn und den, aus diesen Anfangsbedingungen für die

¹⁸durch die Abhängigkeit des Wirkungsgrads der Wärmepumpe vom unteren Temperaturniveau des Prozesses

Zeitspanne Δt extrapolierten Flüßen zwischen den Volumenelementen. Die Differentialgleichung (9.16) wurde hierfür auf ihre grundlegenden physikalischen Eigenschaften zurückgeführt und diese für ein Simulationsmodell durch Funktionen modularisiert.

Das Modell beinhaltet die wichtigsten Einflussgrößen auf den Wärmefluss und -inhalt wie Speicherkapazität und Wärmeleitfähigkeit der jeweiligen Volumenelemente und den Wärmeaustausch zwischen Boden und Luft. Für das Modell wurde davon ausgegangen, dass die Beschaffenheit des Bodens mit der Tiefe variieren kann. Horizontale Ebenen haben jeweils konstante physikalische Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit λ , spezifische Wärmekapazität c , Masse m , Feuchte f , etc. Jedes Volumenelement kann Wärme mit benachbarten Volumenelementen austauschen. An den seitlichen Grenzschichten des Modells kann keine Wärme ausgetauscht werden¹⁹. Dies stellt für das Modell periodische Rahmenbedingungen dar. Aufgrund der entstehenden Symmetrien im Modell kann die Größe und somit der Rechenaufwand für die Modelle reduziert werden. In die unterste Schicht wird nach [Huber (1999)] von unten ein konstanter Fluss von $0,065 \text{ W/m}^2$ eingespeist. Zwischen der obersten Schicht und der Luft ergeben sich Wärmeflüsse aufgrund von solarer Einstrahlung, Planckscher Abstrahlung, Reflektion langwelliger Strahlung an Wolken und konvektivem Austausch von Wärme zwischen der Luft und der Bodenoberfläche.

Einen Einstieg in die Numerik der Wärmeleitungsgleichung ist beispielsweise in [Baehr u. Stephan (2006)] gegeben. Weiterführend ist das Thema in [Larsson u. Thomée (2006)] behandelt.

In einem ersten Schritt wurde das Problem räumlich ($\Delta \vec{x}$) und zeitlich (Δt) diskretisiert und somit in Differenzengleichungen überführt. Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung (9.16) kann durch die Differenzengleichungen an den diskreten Stellen $\vec{x}_0 \cdot \Delta \vec{x}$ und $t_0 \cdot \Delta t$ approximiert werden. Je kleiner die Schrittweiten der Diskretisierung gewählt werden, desto genauer approximiert die numerische Lösung die Wärmeleitungsgleichung. Im Grenzwert geht sie in die Wärmeleitungsgleichung über. Allerdings erhöht diese Maßnahme sowohl Rechenzeit als auch den Speicheraufwand enorm. Rechen- und Speicheraufwand sind bei den späteren Szenarienläufen gegen die Genauigkeit der Diskretisierung abzuwägen.

Aus Gleichung (9.16) ergibt sich im diskreten, eindimensionalen Fall:

$$\frac{\Delta T_t}{\Delta t} = \lambda_T \frac{\Delta T_x}{\Delta x^2} + \frac{P_{\text{ext}}}{\rho c} \quad (9.66)$$

Für fast alle Bodenelemente des späteren Modells ist die extern in das jeweilige Volumenelement eingebrachte Leistung $P_{\text{ext}} = 0$. Nur für Bodenelemente die einen Wärmekollektor beinhalten kann $P_{\text{ext}} \neq 0$ gelten.

Die Wechselwirkung von Zeitschritt τ zu Zeitschritt $\tau + 1$ zwischen Element i und $i \pm 1$ mit $i, \tau \in \mathbb{N}$ sind bestimmt durch:

$$\frac{T_{i,\tau+1} - T_{i,\tau}}{\Delta t} = \lambda_T \frac{(T_{i+1,\tau} - T_{i,\tau}) + (T_{i-1,\tau} - T_{i,\tau})}{(\Delta x)^2} \quad (9.67)$$

bzw.

$$T_{i,\tau+1} = T_{i,\tau} + M (T_{i+1,\tau} - 2T_{i,\tau} + T_{i-1,\tau}) \quad (9.68)$$

¹⁹Diese Ebenen erscheinen als Spiegelebenen. Vgl. [Baehr u. Stephan (2006)]

mit

$$M := \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \lambda_T. \quad (9.69)$$

M wird als Modul oder Fourier-Zahl des Differenzenverfahrens bezeichnet.

An den Rändern des Modells und in Volumenelementen in denen $P_{\text{diss}} \neq 0$ ist (z.B. Volumenelemente mit Wärmekollektor) ergeben sich zusätzliche Terme.

9.3.1. Stabilität der Lösung

Das Differenzenverfahren hat die Eigenschaft, dass sich Fehler, die sich zwangsläufig aus der Diskretisierung²⁰ ergeben fortpflanzen und somit das Ergebnis verfälschen können. Durch die Fortpflanzung der Fehler kann es zum Divergieren der Lösung kommen. Die Größe der Fehler ist dabei von der Wahl der diskreten Zeit- und Raumschritte abhängig. Durch geschickte Wahl der Zeit- und Raumschritte kann die Stabilität der Lösung sichergestellt werden. Im Folgenden soll die Stabilitätsbedingung hergeleitet werden.

Für periodische Rahmenbedingungen gilt als Lösung für die Wärmeleitungsgleichung Gleichung (9.41):

$$T(x, t) = \exp \{ -\kappa^2 t \} \underbrace{\left(A \exp \left\{ i \sqrt{\frac{\kappa^2}{\lambda_T}} x \right\} + B \exp \left\{ -i \sqrt{\frac{\kappa^2}{\lambda_T}} x \right\} \right)}_{\equiv \alpha(x)} \quad (9.70)$$

Somit ist die Temperatur T am Ort x zur Zeit $t + \Delta t$:

$$\begin{aligned} T(x, t + \Delta t) &= \exp \{ -\kappa^2 (t + \Delta t) \} \alpha(x) \\ &= \exp \{ -\kappa^2 \Delta t \} \cdot (\exp \{ -\kappa^2 t \} \alpha(x)) \\ &= \exp \{ -\kappa^2 \Delta t \} \cdot T(x, t) \end{aligned} \quad (9.71)$$

Für jeden beliebigen Ort x hat somit Gleichung (9.71) vereinfacht die Form:

$$T(t + \Delta t) = m(\Delta t) \cdot T(t) \quad (9.72)$$

²¹Die Bedingung

$$|m| \leq 1 \quad (9.73)$$

gewährleistet, dass sich die Temperaturdifferenz zwischen T und T_0 ²² zwischen den Zeitpunkten t und $t + \Delta t$ maximal vollständig abbaut. Für Gleichung (9.71) folgt:

$$|\exp \{ -\kappa \Delta t \}| \leq 1 \quad (9.74)$$

²⁰und durch Rundungsfehler aufgrund der Begrenztheit der Speicherkapazität von Variablen der Computer

²¹Eigentlich die Form $T(t + \Delta t) = T_0 + m(\Delta t) \cdot T(t)$ jedoch wurde T_0 ohne Beschränkung der Allgemeinheit gleich Null gesetzt.

²²=0

Für den analytischen Fall ist Bedingung (9.74) immer erfüllt. Für den diskreten Fall ergibt sich $\exp\{-\kappa\Delta t\}$ durch Einsetzen der analytischen Lösung in die Differenzengleichung.

Für die linke Seite von Gleichung (9.67) ergibt sich somit:

$$\begin{aligned} & \frac{T(x, t + \Delta t) - T(x, t)}{\Delta t} = \\ &= \frac{\exp\{-\kappa^2 t\} \exp\{-\kappa^2 \Delta t\} \alpha(x) - \exp\{-\kappa^2 t\} \alpha(x)}{\Delta t} \\ &= \frac{\exp\{-\kappa^2 \Delta t\} - 1}{\Delta t} \cdot T(x, t) \end{aligned} \quad (9.75)$$

Einsetzen der allgemeinen Lösung in die rechte Seite von Gleichung (9.67) ergibt:

$$\begin{aligned} & \lambda_T \frac{(T(x + \Delta x, t) - T(x, t)) + (T(x - \Delta x, t) - T(x, t))}{(\Delta x)^2} = \\ &= \frac{\lambda_T}{(\Delta x)^2} \left(\exp\left\{i\sqrt{\frac{\kappa^2}{\lambda_T}} \Delta x\right\} - 2 + \exp\left\{-i\sqrt{\frac{\kappa^2}{\lambda_T}} \Delta x\right\} \right) \exp\{-\kappa^2 t\} \alpha(x) \\ &= \frac{\lambda_T}{(\Delta x)^2} \left(\exp\left\{i\sqrt{\frac{\kappa^2}{\lambda_T}} \Delta x\right\} - 2 + \exp\left\{-i\sqrt{\frac{\kappa^2}{\lambda_T}} \Delta x\right\} \right) T(x, t) \end{aligned} \quad (9.76)$$

Somit lässt sich Gleichung (9.67) schreiben als:

$$\begin{aligned} \frac{\exp\{-\kappa^2 \Delta t\} - 1}{\Delta t} &= \frac{\lambda_T}{(\Delta x)^2} \left(\exp\left\{i\sqrt{\frac{\kappa^2}{\lambda_T}} \Delta x\right\} - 2 + \exp\left\{-i\sqrt{\frac{\kappa^2}{\lambda_T}} \Delta x\right\} \right) \\ &= \frac{-4\lambda_T}{(\Delta x)^2} \sin^2 \left(\sqrt{\frac{\kappa^2}{4\lambda_T}} \Delta x \right) \end{aligned} \quad (9.77)$$

Für die Bedingung aus Gleichung (9.74) ergibt sich somit

$$\begin{aligned} & (\exp\{-\kappa\Delta t\})^2 \leq 1 \\ & 1 - \frac{8\lambda_T \Delta t}{(\Delta x)^2} \sin^2 \left(\sqrt{\frac{\kappa^2}{4\lambda_T}} \Delta x \right) + \frac{16\lambda_T^2 \Delta t^2}{(\Delta x)^4} \sin^4 \left(\sqrt{\frac{\kappa^2}{4\lambda_T}} \Delta x \right) \leq 1 \\ & \frac{2\lambda_T \Delta t}{(\Delta x)^2} \sin^2 \left(\sqrt{\frac{\kappa^2}{4\lambda_T}} \Delta x \right) \leq 1 \\ & \frac{(\Delta x)^2}{\Delta t} \geq 2\lambda_T \end{aligned} \quad (9.78)$$

Die Stabilitätsbedingung für das Differenzenverfahren ergibt sich dementsprechend zu:

$$\Delta x \geq \sqrt{2\lambda_T \Delta t} \quad \text{bzw.} \quad \Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2}{2\lambda_T} \quad (9.79)$$

Nach [Baehr u. Stephan (2006)]²³ ist ein weiterer Weg zur Bestimmung der Stabilitätsbedingung gegeben. Demnach darf kein Koeffizient einer Differenzengleichung negativ sein. Gleichung (9.68) kann auch geschrieben werden als

$$T_{i,\tau+1} = M T_{i+1,\tau} + (1 - 2M)T_{i,\tau} + M T_{i-1,\tau}. \quad (9.80)$$

Somit ergibt sich die Stabilitätsbedingung $1 - 2M \geq 0$ aus der ebenfalls die Bedingung

$$\Delta x \geq \sqrt{2\lambda_T \Delta t} \quad \text{bzw.} \quad \Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2}{2\lambda_T} \quad (9.81)$$

folgt.

²³Seite 215

10. Modellierung

10.1. Module

Das Simulationsmodell wurde modular aufgebaut. Die unterschiedlichen Module wurden in VBA¹ in Form von Funktionen verwirklicht. Veränderbare Eingabeparameter² werden aus Excel Tabellenblättern eingelesen, fixe Parameter³ werden im Programmcode hinterlegt.

Die Temperaturverteilung im Boden $T_B(k, \tau = 0)$ wird in Abhängigkeit der Bodentiefe als Anfangsbedingung der Simulation eingelesen. Die Randbedingung des Systems stellen die Wetterdaten dar⁴. Diese liegen in stündlicher Auflösung vor. Effekte geringerer Zeitskalen, welche sich im Allgemeinen nur durch eine Veränderung der Globalstrahlung aufgrund von wechselnder Bewölkung oder sonstiger Verschattung ergeben wurden nicht berücksichtigt. Somit wurde die Wahl der zeitlichen Auflösung Δt des Modells mit 1 h gewählt. Bei typischen Werten für die Bodenbeschaffenheit von $\lambda_T \approx (0,1 \text{ bis } 1) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ergibt sich aus Gleichung (9.79) eine räumliche Auflösung von $\Delta x \geq 8,5 \text{ cm}$.

10.1.1. Modul Wärme \longleftrightarrow Temperatur

In der Wärmeleitungsgleichung (9.16) werden Temperatur-Flüsse aufgrund von Temperatur-Gradienten berechnet. Im Simulationsmodell wurde diese globale Beschreibung des Problems in einzelne Module zerlegt. Die später beschriebenen Module bestimmen die Wärmeflüsse im System. Das Modul Wärme \implies Temperatur berechnet die Temperatur jedes Volumenelements aufgrund seines Wärmeinhalts $Q_B(i, j, k, \tau)$. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Wärmeinhalt folgt im betrachteten Temperaturbereich relativ einfachen Gesetzmäßigkeiten. In trockenem Boden gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen Wärmeinhalt und Temperatur. Es gilt Gleichung (9.11). Ist im Boden Feuchte enthalten gilt dieser lineare Zusammenhang nicht. Während des Phasenübergangs der Bodenfeuchte zwischen flüssig und fest muss zusätzlich die latente Wärme von Wasser berücksichtigt werden. Um dies in möglichst einfacher Form zu bewerkstelligen wurde im Modell per Definition der Wärmeinhalt der Volumenelemente für den Fall $T_B(i, j, k, \tau) = 0^\circ\text{C}$ und sämtliches im Volumenelement enthaltenes Wasser liegt in flüssiger Form vor auf $Q_B(i, j, k, \tau) = 0 \text{ kWh}$ festgelegt. Nach [Ramming (2007)]⁵ gefriert Wasser in Böden nicht bei einem Temperaturpunkt, sondern über einen Temperaturbereich. Um dem Rechnung zu tragen wurde die latente Wärme des Wassers, gleich dem

¹Visual Basic for Applications

²z.B. Tiefenprofil der spezifischen Wärmekapazität des trockenen Bodens

³z.B. spezifische Wärmekapazität von Wasser

⁴Weitere Randbedingungen wie Grundwasserfluss und Erdwärme werden zu einem späteren Zeitpunkt berücksichtigt.

⁵Seite 35 Abbildung 1.7.

Verhalten ohne Phasenübergang linear auf einen Temperaturbereich⁶ bezogen. Für die Module ergeben sich somit drei Definitionsbereiche mit unterschiedlichen Werten für Massen m und spezifischen Wärmekapazitäten c .

| Definitionsbereich | $C(T_B) =$ |
|---|---|
| $T_B(i, j, k, \tau) > 0^\circ\text{C}$ | $m_B \cdot c_B + m_W \cdot c_W$ |
| $0^\circ\text{C} \leq T_B(i, j, k, \tau) \leq -2^\circ\text{C}$ | $m_B \cdot c_B + m_W \cdot c_W + m_E \cdot c_E + c_L \cdot m_{E+W}$ |
| $T_B(i, j, k, \tau) < -2^\circ\text{C}$ | $m_B \cdot c_B + m_W \cdot c_E$ |

Tabelle 10.1.: Definitionsbereich Module Wärme \iff Temperatur

mit den Indizes

- B trockener Boden,
- W Wasser,
- E Eis und
- L latente Wärme (im rechnerischen Wert c_L).

Zwischen Wärme und Temperatur gelten folgende Relationen

$$Q_B(i, j, k, \tau) = C(T_B) \cdot T_B(i, j, k, \tau) \quad (10.1)$$

und

$$T_B(i, j, k, \tau) = \frac{Q_B(i, j, k, \tau)}{C(T_B)}, \quad (10.2)$$

die in zwei Modulen verwirklicht wurden.

10.1.2. Modul Fourier'sches Gesetz

Das zentrale Modul des Modells beschreibt die Flüsse innerhalb des Bodens. Es wird ein begrenztes Volumen betrachtet. Innerhalb der Grenzen wird das Volumen in quaderförmige Volumenelemente eingeteilt. Jedes Volumenelement kann durch den Vektor $\vec{i} = (i, j, k)$ indiziert werden. Der Wärmefluss zwischen den Volumenelementen wird durch das diskretisierte Fourier'sche Gesetz (9.3) und Gleichung (9.5) berechnet^{7 8}.

$$\Phi_{B,\vec{i}} = -\lambda_{B,k} \cdot \sum_{\vec{i}'=\vec{i}\pm 1} \left(\frac{\Delta T_{\vec{i},\vec{i}'}}{|\Delta \vec{x}_{\vec{i},\vec{i}'}|} A_{\vec{i},\vec{i}'} \right) \quad (10.3)$$

bzw.

$$\Delta Q_{B,\vec{i}} = \Phi_{B,\vec{i}} \Delta t(\tau) \quad (10.4)$$

mit

⁶In den späteren Szenarien zwischen 0 und -2°C

⁷Funktion `fct_dQ_B` im Programm Code

⁸Volumenelemente werden durch den Vektor \vec{i} indiziert mit $\vec{i} = (i, j, k)$. $\vec{i} \pm 1$ ist dabei komponentenweise zu verstehen, also $\vec{i} \pm 1 \in \{(i+1, j, k), (i-1, j, k), (i, j+1, k), \dots\}$.

| | |
|--------------------------------------|---|
| $\Phi_{B,\vec{i}}$ | Wärmestrom aus den Nachbarvolumina in das Volumen \vec{i} , |
| $\lambda_{B,k}$ | Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Bodentiefe, |
| $\Delta T_{\vec{i},\vec{j}}$ | Temperaturdifferenz zwischen den benachbarten Volumina, |
| $ \Delta \vec{x}_{\vec{i},\vec{j}} $ | Abstand der Mittelpunkte der benachbarten Volumina, |
| $A_{\vec{i},\vec{j}}$ | Kontaktfläche der Volumina, |
| $\Delta Q_{B,\vec{i}}$ | Wärmemenge aus den Nachbarvolumina in das Volumen \vec{i} und |
| Δt | Länge des Zeitintervall τ |

Das Modul berücksichtigt keinen Wärmefluss über die seitlichen Grenzen des Gesamtvolumens hinaus. Dadurch erscheinen diese Volumengrenzen als Symmetrieebenen⁹.

10.1.3. Oberflächen Modul

Das Oberflächen Modul ermöglicht einen Energiefluss zwischen der Bodenoberfläche und der Umgebung. Es berücksichtigt den Temperaturunterschied zwischen Bodenoberfläche und Luft, die einfallende Globalstrahlung und die Planck'sche Abstrahlung des Bodens.

Wärmeleitung findet auch über Materialgrenzen hinweg und somit auch am Übergang Boden - Luft statt. Luft ist ein schlechter Wärmeleiter. Aufgrund der starken Abhängigkeit der Dichte von Fluiden von der Temperatur und der Beweglichkeit der Atome und Moleküle als Wärmeträger kommt es, angetrieben durch die Gravitationskraft (und Wind) zu Konvektion. Der Übergang von Wärme zwischen Festkörpern und Luft und der konvektive Abtransport kann im betrachteten Temperaturbereich von ca. $10^\circ\text{C} \pm 30^\circ\text{C}$ als direkt proportional zur Temperaturdifferenz betrachtet werden.

$$P_{\text{Konv}}(i, j, \tau) = \Delta x_i \cdot \Delta y_j \alpha \cdot (T_L(\tau) - T_B(i, j, \tau - 1)) \quad (10.5)$$

mit

| | |
|-------------------------------|--|
| $P_{\text{Konv}}(i, j, \tau)$ | Leistungsaustausch durch die Oberfläche des Elements i, j zum Zeitpunkt τ , |
| Δx_i | Länge des i -ten Elements in x-Richtung, |
| Δy_j | Länge des j -ten Elements in y-Richtung, |
| α | Proportionalitätsfaktor, |
| T_L | Lufttemperatur, |
| T_B | Bodentemperatur. |

Der Proportionalitätsfaktor α Beispielsweise für Außenwände ist nach [Wetzell (2004)] auf $20 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-2}$ festgelegt. In dieser Definition beinhaltet α jedoch ebenso Abstrahlungseinflüsse. Für das Modell wird α durch den Vergleich von Modell und Messdaten ermittelt.

Zur Berechnung der Planck'schen Abstrahlung wurde ein über das gesamte Jahr und die gesamte Bodenoberfläche konstanter Emissionsfaktor ϵ angenommen. Die Abstrahlung ergibt sich zu

$$P_{\text{Planck}}(i, j, \tau) = \epsilon \sigma \Delta x_i \cdot \Delta y_j (T_B(i, j, \tau - 1)^4 - T_H(\tau)^4). \quad (10.6)$$

⁹Benachbarte Volumenelemente die keine Wärme austauschen erscheinen in jedem Zeitschritt als temperaturgleich. Dadurch haben diese Ebenen die gleichen Eigenschaften wie Symmetrieebenen. Außenflächen-Module können die Symmetrie brechen. Symmetriebrechende Außenflächen-Module sind das Oberflächen Modul, das Grundwasser Modul und das Erdwärme Modul

T_H ist dabei die Temperatur des Himmels. Diese ist vom Bewölkungsgrad abhängig und wurde für klaren Himmel auf -40°C , für leicht bewölkten Himmel auf -20°C und für stark bewölkten Himmel auf die Bodentemperatur $T_B(i, j, \tau - 1)$ festgelegt.

Die solaren Gewinne im Boden sind proportional zur Globalstrahlung.

$$P_{sG}(i, j, \tau) = \epsilon \Delta x_i \cdot \Delta y_j P_{\text{Glob}}(\tau) \quad (10.7)$$

Dabei wird der Absorptionsfaktor gleich dem Emissionsfaktor ϵ der Planck'schen Strahlung angenommen.

Der Gesamtfluss an Wärme aus der Luft in den Boden ist

$$\Delta Q_{\text{OM}}(i, j, \tau) = (P_{\text{Konv}}(i, j, \tau) + P_{sG}(i, j, \tau) - P_{\text{Planck}}(i, j, \tau)) \Delta t(\tau). \quad (10.8)$$

mit

| | |
|-------------------------------|--|
| $\Delta x_i \cdot \Delta y_j$ | Größe der Oberfläche von \vec{i} , |
| T_L | Lufttemperatur (2 m Höhe), |
| T_B | Oberflächentemperatur des Bodens, |
| T_H | Temperatur des Himmels, |
| σ | Stefan Boltzmann Konstante ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$), |
| $P_{\text{Glob}}(\tau)$ | Globalstrahlung des Zeitintervalls τ . |
| $\Delta t(\tau)$ | Länge des Zeitintervalls τ . |

10.1.4. Erdwärme Modul

Im Erdwärme Modul wird der radiale Wärmefluss aus dem Erdinneren an die Erdoberfläche berücksichtigt. Der Wärmefluss wird durch den Temperaturgradient zwischen Erdinnerem und der Erdoberfläche angetrieben. Die hohe Temperatur im Erdinneren wird durch die natürliche Spaltung von schweren Atomkernen aufrechterhalten. Im Modell wird von einem gleichmäßigem Wärmefluss von $P_{\text{Erd}} = 0,065 \text{ Wm}^{-2}$ in die tiefste Modellebene ausgegangen

$$\Delta Q_{\text{Erd}}(i, j, \tau) = P_{\text{Erd}} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta y_j \cdot \Delta t. \quad (10.9)$$

10.1.5. Grundwasser Modul

Im Grundwasser Modul wird berücksichtigt, dass es in bestimmten Ebenen zu einem horizontalen Wärmetransport aufgrund eines Grundwasserdrifts kommen kann. Im Modell kann für jede Ebene eine Driftgeschwindigkeit von Grundwasser in $+x$ -Richtung angegeben werden. Aus Höhe Δz_k , Breite Δy_j und Driftgeschwindigkeit $v_{\text{GW},k}$ kann der Massefluss \dot{m}_W berechnet werden. Es wird davon ausgegangen, dass es zwischen Grundwasser und (trockenem) Boden innerhalb der der Länge Δt jedes Zeitintervalls τ zu einem vollständigen Wärmeausgleich kommt. Die Bilanz der Wärmemenge die somit, mit dem Grundwasser in ein Volumenelement fließt beträgt:

$$\Delta Q_{\text{GW}}(i, j, k, \tau) = c_W \dot{m}_W(i, j, k) (T_B(i - 1, j, k, \tau - 1) - T_B(i + 1, j, k, \tau - 1)). \quad (10.10)$$

10.1.6. Kollektor/Wärmepumpen Modul

Bei einer Wärmepumpe wird die Arbeit W_{WP} eingesetzt um einem Medium die Wärmemenge Q_K zu entziehen und einem wärmerem Medium die Wärmemenge Q_H zuzuführen¹⁰. Dabei gilt für reale Prozesse¹¹

$$Q_H \leq Q_K + W_{WP}. \quad (10.11)$$

Für einen Carnot-Prozess wird das Ungleichheitszeichen in Gleichung (10.11) zum Gleichheitszeichen. Die (Carnot-) Leistungszahl COP_{Car} einer Wärmepumpe ist im Folgenden definiert als:

$$\begin{aligned} COP_{Car} &= \frac{Q_H}{W_{WP}} \\ &= \frac{Q_H}{Q_H - Q_K} \\ &= \frac{T_H}{T_H - T_K} \end{aligned} \quad (10.12)$$

Vereinfachend werden im Folgenden alle Verluste wie Rohrreibung, Pumpenwirkungsgrad,... im Umwandlungswirkungsgrad η_{el} von elektrischer Energie in Arbeit zusammengefasst. Dieser liegt im Allgemeinen in einem Bereich von 45% - 55%. Für den Zusammenhang zwischen nötiger mechanischer und aufgenommener elektrischer Energie ergibt sich

$$W_{WP} = \eta_{el} \cdot E_{el}. \quad (10.13)$$

Die reale Leistungszahl der Wärmepumpe COP_{WP} unter Berücksichtigung der Verluste ergibt sich aus.

$$COP_{WP} = \eta_{el} \cdot COP_{Car} \quad (10.14)$$

Aus den Gleichungen (10.11) und (10.12) ergibt sich die Wärmenachfrage Q_K an einen Wärmekollektor anhand der Wärmenachfrage Q_H eines Gebäudes zu

$$Q_K = Q_H \frac{T_K}{T_H} \quad (10.15)$$

T_K ist dabei die Kollektortemperatur, T_H das Temperaturniveau der Wärmenachfrage. Im Modell wird davon ausgegangen, dass ein perfekter thermischer Kontakt ohne Widerstand zwischen dem Kollektor und dem jeweiligen Volumenelement gegeben ist. Somit entspricht die Kollektortemperatur im Volumenelement der Temperatur des Volumenelements. Um einen gleichmäßigen Entzug von Umweltwärme durch den Kollektor zu gewährleisten wurde die Entzugskapazität jedes Volumenelements mit Kollektor entsprechend seines Volumenanteils Normiert. Das Modul ist für Volumenelemente mit Kollektor definiert¹² und wird durch die Funktion

$$\Delta Q_K(i, j, k, \tau) = Q_H(\tau) \frac{V_{i,j,k}}{V_K} \frac{T_K(i, j, k, \tau - 1)}{T_H} \quad (10.16)$$

mit

¹⁰Index K für Erdwärmekollektor, Index H für Haus

¹¹siehe [Demtröder (2006)] Seite 335 Abb. 10.61.

¹² $\vec{i} \in Koll$

| | |
|--------------------------------------|---|
| $\Delta Q_K(i, j, k, \tau)$ | Änderung der Wärmemenge des Kollektor im Volumenelement, |
| Q_H | von der Wärmepumpe zu befriedigende Wärmenachfrage, |
| $V_{i,j,k}$ | Volumen eines Volumenelements mit Kollektor, |
| $V_K = \sum_{\in K_{oll}} V_{i,j,k}$ | Gesamtvolumen der Volumenelemente mit Kollektoren, |
| $T_K(i, j, k, \tau - 1)$ | Kollektortemperatur im letzten Zeitschritt, |
| T_H | Temperaturniveau der Wärmenachfrage (40 °C für Heizung, 70 °C für Warmwasser) |

implementiert. Positive Werte für $\Delta Q_K(i, j, k, \tau)$ entziehen dem Boden Wärme.

10.1.7. Kollektor-Rückspeisung Modul

Es ist möglich, die Wärme Q_R , z.B. aus einer Hauskühlung oder aus einem Solarkollektor über den Bodenkollektor in den Boden Rückzuführen. Die vom Kollektor an einzelne Volumenelemente abgegebene Wärmemenge $\Delta Q_K(i, j, k, \tau)$ ist dabei durch

$$\Delta Q_K(i, j, k, \tau) = -\frac{1}{R_{i,j,k}} \cdot (T_K(i, j, k, \tau - 1) - T_B(i, j, k, \tau - 1)) \quad (10.17)$$

bestimmt. Da im Modell kein Kühlmittelfluss simuliert wird, muss der maximale Wärmefluss aus dem Kollektor in den Boden durch die, mit dem jeweiligen Bodenvolumen gewichteten maximalen Wärmemenge begrenzt werden.

$$\Delta Q_K(i, j, k, \tau) \geq -Q_R(\tau) \frac{V_{i,j,k}}{V_K} \quad (10.18)$$

mit

| | |
|-----------------------------|--|
| $\Delta Q_K(i, j, k, \tau)$ | Änderung der Wärmemenge des Kollektor im Volumenelement, |
| Q_R | vom Kollektor rückzuführende Wärme, |
| $R_{i,j,k}$ | Gesamtwärmeübergangswiderstand zwischen Kollektorwand und Boden. |

Negative Werte für $\Delta Q_K(i, j, k, \tau)$ führen dem Boden Wärme zu.

10.1.8. Laufsequenz

In jedem Zeitschritt τ führen die Hauptmodule Modul Fourier'sches Gesetz, Oberflächen Modul, Kollektor Modul, Kollektor/Wärmepumpen Modul, Erdwärme Modul und Grundwasser Modul zu Wärmeflüssen im Boden. Diese sind im Modell jeweils abhängig von den Modellvariablen, im Allgemeinen den Bodentemperaturen $T(i, j, k, \tau - 1)$ des vorangegangenen Zeitschritts. Aus dem Wärmeinhalt der Bodenelemente am Ende eines Zeitschritts ergeben sich die Modelltemperaturen $T(i, j, k, \tau)$.

Für jeden Zeitschritt werden folgende externe Wärmeflüsse berechnet.

Wärmelast Haus Die Wärmelast ergibt sich aus den thermischen Eigenschaften des Hauses und dem Wetter.

$$Q_{WLH}(\tau) = \alpha_{TL} \cdot Gt(\tau) - \alpha_{sG} \cdot P_s(\tau) - Q_{int}(\tau) \quad (10.19)$$

mit

| | |
|-----------------|--|
| α_{TL} | spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmefluss [kWh K ⁻¹], |
| $Gt(\tau)$ | Heizgradstunden des Zeitschritts τ [Kh], |
| α_{sG} | spezifische solare Gewinne [kWh kW ⁻¹], |
| $P_s(\tau)$ | Globalstrahlung [kW] und |
| $Q_{int}(\tau)$ | interne Gewinne [kWh]. |

Warmwasserwärmenachfrage Haus Die nachgefragte Leistung für die Bereitstellung von warmem Wasser $Q_{WWH}(\tau)$ ergibt sich aus 8760. Teil des Standardwerts von 12,5 kWh m⁻² a⁻¹.

Raumwärmenachfrage Haus

$$Q_{RWH}(\tau) = Q_{WLH}(\tau) \quad \forall \quad Q_{WLH}(\tau) > 0 \quad (10.20)$$

Raumkältenachfrage Haus

$$Q_K(\tau) = -Q_{WLH}(\tau) \quad \forall \quad Q_{WLH}(\tau) < 0 \quad (10.21)$$

Solarwärme Haus Es ist möglich einen Solarkollektor zu betreiben. Die Wärmemenge des Kollektors ergibt sich zu

$$Q_{sol}(\tau) = P_s(\tau) \cdot A_{solKoll} \cdot \eta_{solKoll} \quad (10.22)$$

mit

| | |
|------------------|--|
| $A_{solKoll}$ | Fläche des Solarkollektors [m ²] und |
| $\eta_{solKoll}$ | Wirkungsgrad des Solarkollektors (Standard in den Modellen 0,7) [1]. |

Für den Fall, dass ein Solarkollektor installiert ist kann diese in einen Wärmepufferspeicher gespeichert werden. Die Nutzung der Wärme des Solarkollektors ist in folgender Reihenfolge vorgegeben.

1. Deckung der Warmwassernachfrage,
2. Deckung der Raumwärmenachfrage,
3. Einspeicherung in den Wärmespeicher,
4. Einspeicherung in den Boden.

Warmwasserwärmenachfrage aus Wärmepumpe

$$Q_{WWWP}(\tau) = Q_{WWH}(\tau) - Q_{solWW}(\tau) - Q_{Sp}(\tau) \quad (10.23)$$

mit

$Q_{solWW}(\tau)$ solare Wärme für Warmwasser und
 $Q_{Sp}(\tau)$ Wärme aus dem Speicher.

Raumwärmenachfrage aus Wärmepumpe

$$Q_{RWWP}(\tau) = Q_{RWH}(\tau) - Q_{solRW}(\tau) - Q_{Sp}(\tau) \quad (10.24)$$

mit

$Q_{solRW}(\tau)$ solare Wärme für Heizwärme und
 $Q_{Sp}(\tau)$ Wärme aus dem Speicher.

Wärmeüberschuss aus Kühlung

$$Q_{KKoll}(\tau) = Q_K(\tau) \quad (10.25)$$

Wärmeüberschuss aus Solarkollektor

$$Q_{solKoll}(\tau) = Q_{sol}(\tau) - Q_{solWW}(\tau) - Q_{solRW}(\tau) - Q_{solSp}(\tau) \quad (10.26)$$

mit

$Q_{solSp}(\tau)$ solare Wärme für den Speicher.

10.2. Überprüfung des Modells

Im Folgenden soll das Modell anhand zweier Szenarien analytisch lösbarer Sonderfälle verifiziert werden. Für eine Überprüfung der Güte der Simulation anhand realisierter Projekte standen im Rahmen dieser Arbeit keine Datensätze zur Verfügung.

10.2.1. Wärmepuls

Im ersten Fall wurde der zeitliche Verlauf der Temperatur in einer Dimension nach dem Einbringen eines Wärmepulses der Größe Q_0 bei $x = 0$ und $t = 0$ betrachtet. Der Verlauf der Wärme kann analytisch, wie bereits in Abschnitt 9.2.4. Temperaturimpuls gezeigt, beschrieben werden. Für die Berechnung mittels dem Simulationsmodell wurden verschiedene räumliche Auflösungen Δx gewählt und verglichen. In Anlehnung an die späteren Bodenmodelle wurden typische Bodenparameter gewählt. Aufgrund der Symmetrie des Modells wurde der Körper nur in positiver x-Richtung betrachtet. Die zeitliche Auflösung des Modells beträgt $\Delta t = 1\text{h}$. Abbildung 10.1 zeigt den Verlauf der analytischen Lösung $T_a(x)$ und die Temperaturen $T_M(x)$ der diskreten Volumenelemente der Modellszenarien für

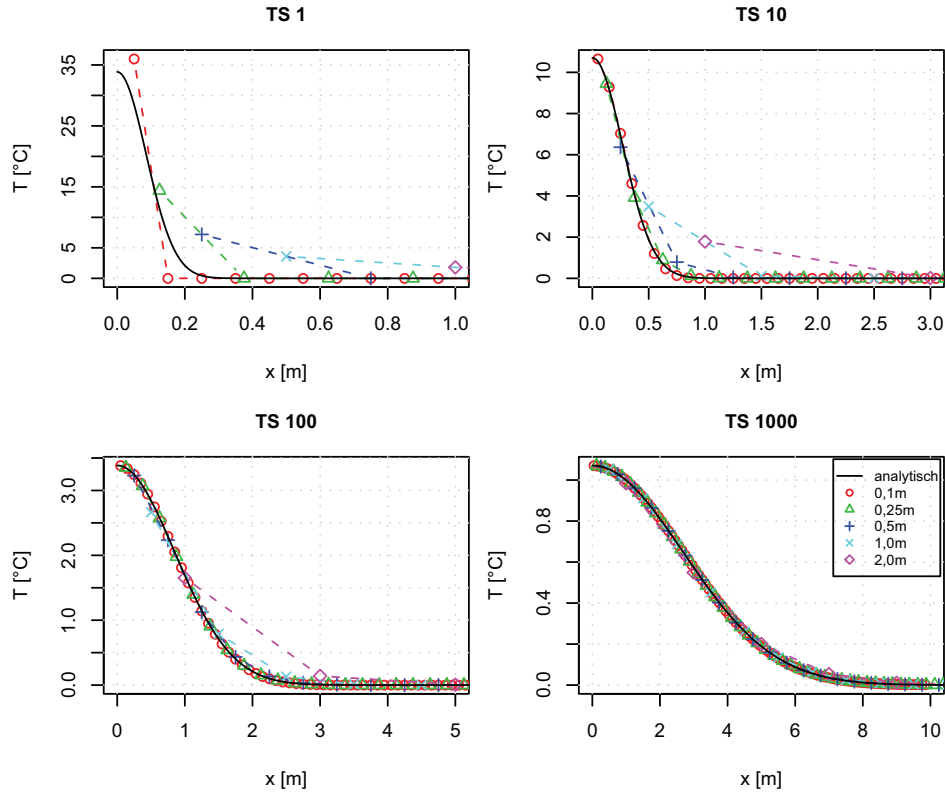


Abbildung 10.1.: Vergleich von numerischer und analytischer Lösung eines Wärmepulses für unterschiedliche räumliche Auflösungen nach 1, 10, 100 und 1000 h.

unterschiedliche Zeiten. Die Abweichung $\Delta T = T_M - T_a$ zwischen den im Modell simulierten und den analytisch ermittelten Temperaturen zeigt Abbildung 10.2.

Es zeigt sich, dass bei sehr kleiner räumliche Auflösung Δx die kurzzeitige Reaktion des Modells fehlerbehaftet ist. Für große Zeiten bildet das Szenario mit der kleinsten räumliche Auflösung die Realität am genauesten ab. Zur Bestimmung der Qualität des Modells wurde das Abweichungsquadrat

$$Abw^2(\Delta x) = \frac{1}{Anz_i} \sum_{i=1}^{Anz_i} (T_M(x_i(\Delta x)) - T_a(x_i(\Delta x)))^2 \quad (10.27)$$

und die maximale Temperaturabweichung

$$DT(\Delta x) = \max_{i=1}^{Anz_i} (T_M(x_i(\Delta x)) - T_a(x_i(\Delta x)))^2 \quad (10.28)$$

definiert. Abbildung 10.3 zeigt, dass sowohl maximale Abweichung $DT(\Delta x)$ als auch $Abw^2(\Delta x)$ ein (lokales) Minimum (für die gewählten Materialeigenschaften bei ca. $\Delta x = 0,25$ m) aufweisen. Die Maximale Abweichung $DT(\Delta x)$ der Temperatur des Modells für eine Auflösung von $\Delta x = 0,24$ m beträgt 0,26 K, das Abweichungsquadrat $Abw^2 = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^2$. Aus $\sqrt{Abw^2}$ ergibt sich eine durchschnittliche Abweichung von $\pm 0,004$ K. Die durch die Modellierung bedingte minimale Auflösung liegt für die Materialparameter und der zeitlichen Auflösung von 1h nach der Stabilitätsbedingung

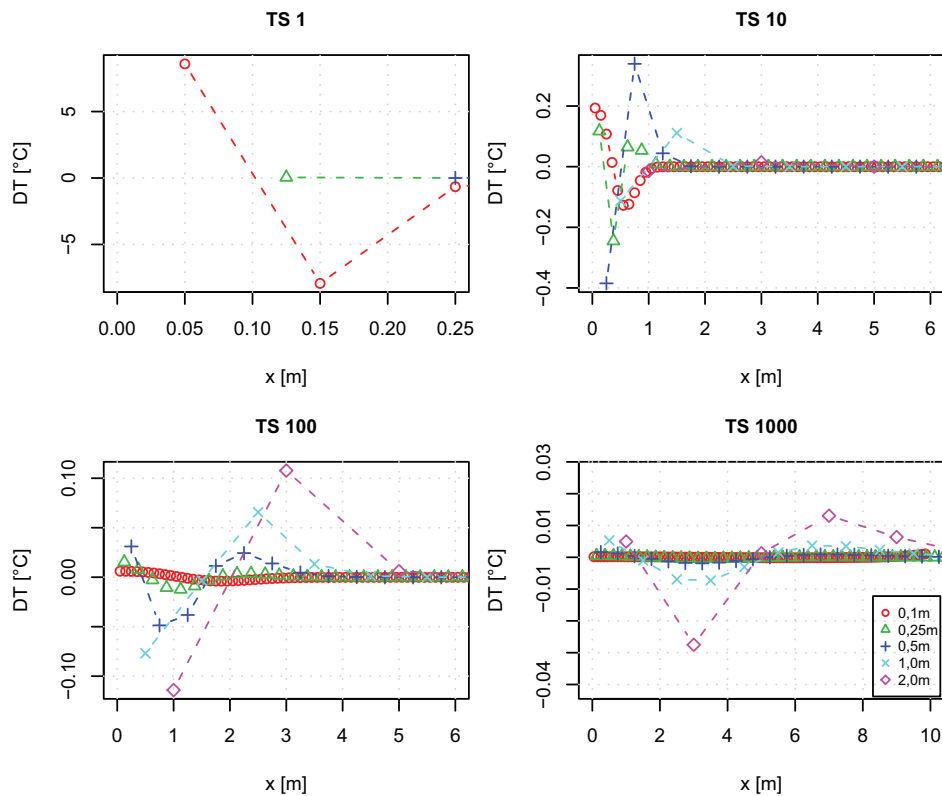


Abbildung 10.2.: Relative Abweichung von numerischer und analytischer Lösung eines Wärmepulses für unterschiedliche räumliche Auflösungen nach 1, 10, 100 und 1000 h.

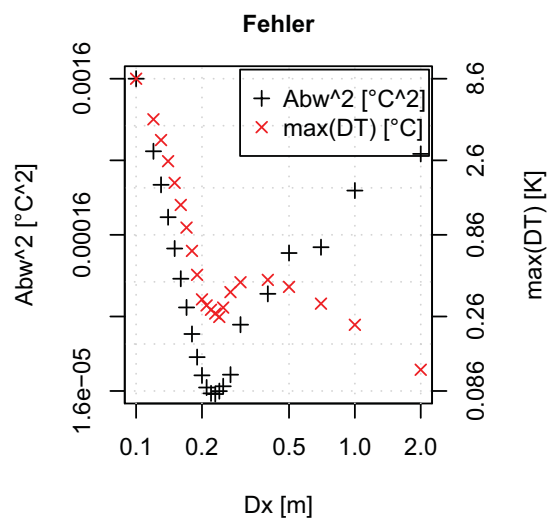


Abbildung 10.3.: Abweichungsquadrat und maximale Abweichung für unterschiedliche räumliche Auflösungen Δx .

nach Gleichung (9.79) bei 0,085 m.

Das Modell gibt sowohl den zeitlichen- als auch räumlichen Verlauf eines Wärmepulses in einem weitem Auflösungsbereich ($\Delta t = 1$ h und $\Delta z \in [0,1 \text{ m}, 2,0 \text{ m}]$) in zufriedenstellender Güte wieder.

10.2.2. periodische Anregung

Der zweite, zur Verifizierung herangezogene Fall ist die Reaktion eines halb unendlichen Körpers auf eine periodische Anregung dessen Oberfläche. Analytisch ist die Temperatur im Körper wie in Kapitel 9.2.3 beschrieben zu ermitteln.

Für das Modell wurden typische Wandparameter (Beton: Siehe Tabelle 9.1) zugrunde gelegt¹³. Die Amplitude der Oberflächentemperatur wurde für den Vergleich auf 1 K festgelegt, die Periodendauer P auf 24 h. Die Dicke der Wandschichten Δx im Modell beträgt 2,0 cm. In Abbildung 10.4 ist der zeitliche Temperaturverlauf im Modell für verschiedenen Tiefen aufgetragen. Es zeigt sich wie zu erwarten mit größerer Eindringtiefe sowohl eine Reduktion der Amplitude als auch eine Verzögerung der Phase.

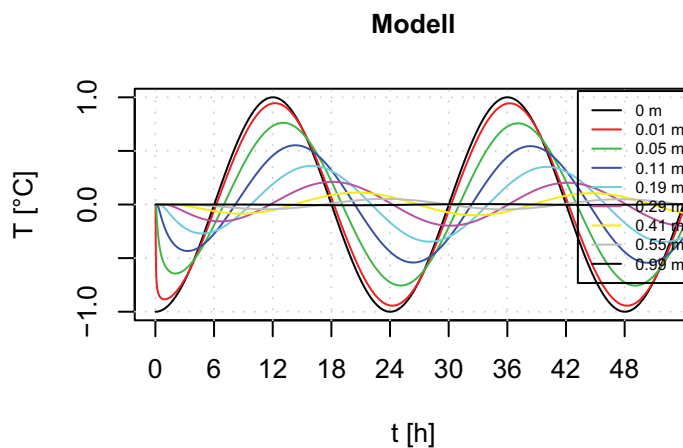


Abbildung 10.4.: Zeitlicher Verlauf der Modelltemperatur in verschiedenen Tiefen.

Abbildung 10.5 zeigt den Vergleich zwischen analytischer und modellierter Lösung¹⁴ in Abhängigkeit der Eindringtiefe für unterschiedliche Zeiten. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung.

Im Simulationsmodell gilt die Anfangsbedingung $T_0 = 0$ K für den gesamten Körper. Diese Bedingung gilt nicht für die analytische Berechnung. In den ersten ca. sechs Stunden ist sowohl in Abbildung 10.4 als auch in Abbildung 10.6 (links) ein deutliches Einschwingverhalten zu sehen. Dabei zeigen die Graphen in Abbildung 10.6 die Differenz $T_{\text{Modell}}(x, t) - T_{\text{analytisch}}(x, t)$.

¹³Hier wurde die Betrachtung einer Betonwand der von Böden vorgezogen, da die täglichen Schwankungen der Temperaturen im Bereich der thermischen Gebäudehüllen eine entscheidende Rolle spielt, wohingegen die täglichen Schwankungen der Bodentemperatur für diese Arbeit eher von untergeordneter Wichtigkeit sind.

¹⁴nach einer Einschwingphase des Modellsystems

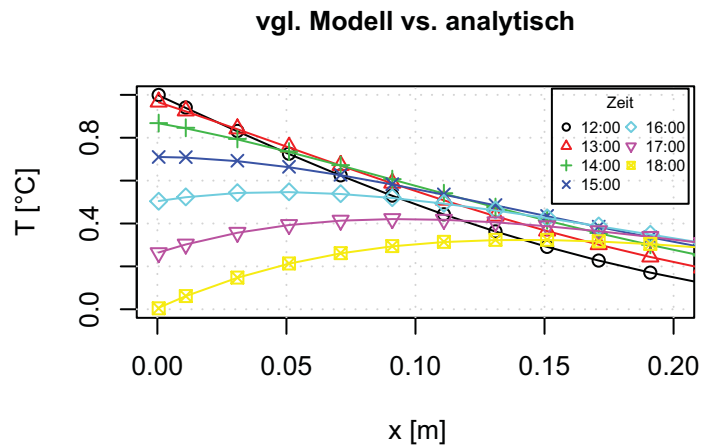


Abbildung 10.5.: Verlauf der Wandtemperatur in Abhängigkeit der Eindringtiefe x zu unterschiedlichen Tageszeiten. Punkte zeigen die Modelltemperaturen, Linien die analytische Lösung.

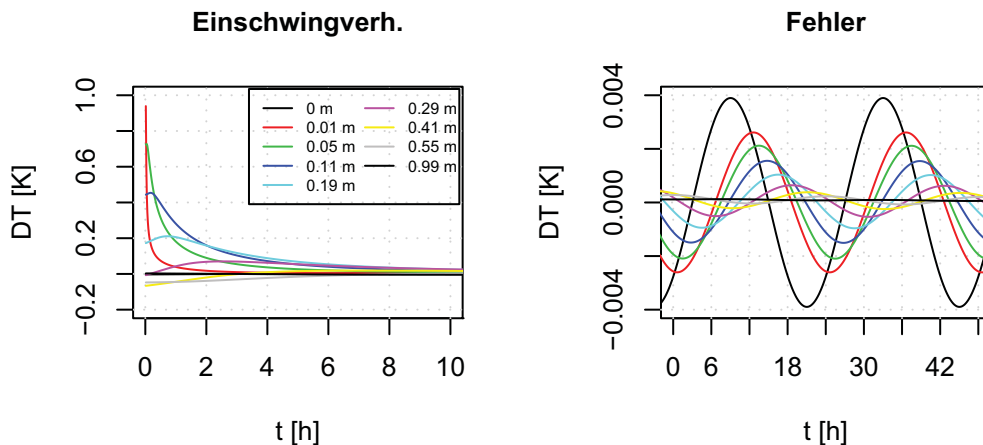


Abbildung 10.6.: Differenz $T_{\text{Modell}}(x, t) - T_{\text{analytisch}}(x, t)$ in Abhängigkeit der Zeit für verschiedenen Tiefen. Links: Einschwingverhalten des Körpers. Rechts: eingeschwungenes System.

Der maximale relative Fehler des Modells¹⁵ liegt für den Fall der periodischen Anregung wie in Abbildung 10.6 (rechts) gezeigt bei unter 0,4%.

Sowohl der Vergleich zwischen analytischer- und modellierter Lösung eines Wärmeimpulses als auch einer periodischen Anregung der Oberfläche eines halbumendlichen Körpers zeigen eine gute Übereinstimmung. Insgesamt wird im Folgenden davon ausgegangen, dass das Modell für die weiterführenden

¹⁵nach dem Einschwingverhalten

Betrachtungen die Realität hinreichend genau abbildet.

10.3. Anfangs- und Rahmenbedingungen

Im Folgenden sollen anhand von Simulationsläufen des Modells und dem Abgleich mit Messdaten [LfL (2009)] sowohl die Rahmenbedingungen des Modells¹⁶ als auch die Anfangsbedingung $T_0(z)$ vor der Inbetriebnahme eines Kollektorsystems für die späteren Modellszenarien bestimmt werden.

Die Datengrundlage für die klimatischen Rahmenbedingungen des Modells sind Wetterdaten der Jahre 1998 bis 2001. Diese beinhalten Temperaturwerte in den Höhen 2 m und 20 cm über dem Boden und 5 bzw. 20 cm unterhalb der Bodenoberfläche. Des Weiteren sind Windgeschwindigkeiten, Globalstrahlung und Regenmengen in stündlicher Auflösung gegeben. Das Oberflächenmodul koppelt Lufttemperatur und Globalstrahlung an das Bodenmodell.

Als Referenzwetter wurden die Wetterdaten des Zeitraums vom 1. Sep. 1998 bis einschließlich 31. Aug. 1999 verwendet. Der durch diese Daten gegebene Verlauf des Wetters über den Zeitraum von einem Jahr wird für die Anzahl der modellierten Jahre zyklisch wiederholt.

Die Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Bodentiefe ist von zwei Effekten bestimmt. Die oberen ca. 10 m des Bodens sind, aufgrund des Wärmeaustauschs zwischen Boden und Atmosphäre vorwiegend durch das Klima bzw. Wetter bedingt. Das Klima und die Oberflächeneigenschaften des Bodens bestimmen dabei ausschlaggebend die Jahresdurchschnittstemperatur der oberen Bodenschichten, das Wetter den Temperaturverlauf während des Jahres (vergleiche beispielsweise mit Abbildung 9.1).

In tieferen Lagen ist der Temperaturverlauf zeitunabhängig und¹⁷ nach Gleichung (9.26) nur von der Tiefe abhängig. Der Gradient ist durch den Wärmestrom aus dem Erdinneren vorgegeben. Es ergibt sich eine lineare Zunahme der Bodentemperatur mit der Tiefe, die durch

$$T(z) = T_{\text{Ob}} + z \frac{q_{\text{Erde}}}{\lambda_{\text{B}}} \quad (10.29)$$

mit

| | |
|----------------------|---|
| $T(z)$ | Jahresdurchschnittstemperatur in Abhängigkeit der Bodentiefe, |
| T_{Ob} | Jahresdurchschnittstemperatur an der Oberfläche, |
| z | Bodentiefe, |
| q_{Erde} | Wärmestrom aus dem Erdinneren und |
| λ_{B} | Wärmeleitfähigkeit des Bodens |

beschrieben werden kann.

Zur Festlegung der Bodenparameter Wärmeleitfähigkeit λ , Dichte ρ , spezifische Wärmekapazität c , Emission- bzw. Absorptionskoeffizient ϵ und Wärmeübergangswiderstand der Oberfläche R_{Ob} wurden die Modelltemperaturen in 20 cm Bodentiefe mit den entsprechenden Messwerten aus den Wetterdaten verglichen. Dazu wurde jeweils ein Satz aus Parametern gewählt und der Temperaturverlauf im Boden für einen Modellzeitraum von 100 Jahren simuliert. Der Temperaturverlauf im Boden des 100. Jahres wurde dann mit den gemessenen Bodentemperaturdaten der Wetterdatenbank verglichen.

¹⁶Wärmeleitfähigkeit λ , Absorptions- und Emissionsgrad ϵ , Bodendichte ρ ,...

¹⁷bei räumlich und zeitlich konstanter Wärmeleitfähigkeit $\lambda(z, t) = \lambda$

Abbildung 10.7 zeigt den Temperaturunterschied zwischen Modell und Messung in einer Bodentiefe von 20 cm für einen Satz an Parametern für ein Jahr.

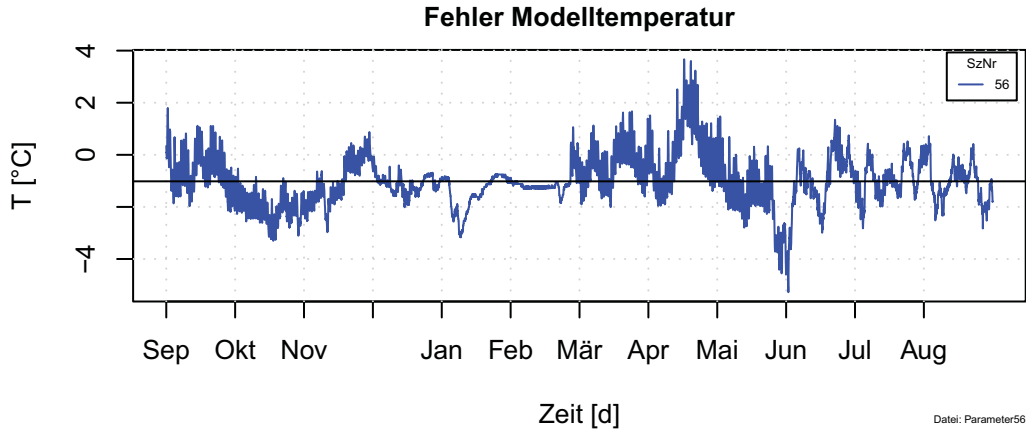


Abbildung 10.7.: Abweichung und mittlere Abweichung der Modelltemperatur mit den Parametern $\lambda_{Ob} = 5,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $R_{Ob} = 0,7 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$, $\epsilon = 0,3$, $\rho = 1500 \text{ kg m}^{-3}$ und $c = 1100 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Unter Variation der Parameter zeigte sich, dass sich durch einen Satz an Bodenparametern bestimmte Zeitperioden des Modelljahres gut beschreiben lassen. Bei der Beschreibung eines ganzen Jahres mit einem festen Parametersatz kommt es zeitweise zu größeren Abweichungen zwischen Modell- und Messtemperaturen. Zur Findung des optimalen Parametersatzes wurden folgende Hilfsgrößen betrachtet.

$$Res(\tau) = T_{Mod}(\tau) - T_{Mess}(\tau) \quad (10.30)$$

$$Abw^2 = \frac{1}{Anz(\tau)} \sum_{\tau=1}^{Anz(\tau)} Res(\tau)^2 \quad (10.31)$$

Mit Abw^2 ist somit ein Kriterium gegeben, um die Übereinstimmung von Modell und Messwerten zu optimieren.

Abbildungen 10.8, 10.9 und 10.10 zeigen die Modell- und die Messtemperaturen für März, Juni bzw. September für die jeweils optimalen Parameter.

Letztendlich wurden als Standardparameter¹⁸ für die folgenden Modelle die Werte $\lambda_{Ob} = 3,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $R_{Ob} = 0,7 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$, $\rho = 1500 \text{ kg m}^{-3}$, $c = 1100 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und $\epsilon = 0,3$ ermittelt. Abbildung 10.11 zeigt den Verlauf der Abweichung der Modell- von der Messtemperatur im Jahresverlauf in 20 cm Bodentiefe für diese Parameter.

Die Standardparameter sind nur bedingt physikalisch erklärbar. Absorptionskoeffizienten von Böden sind im Allgemeinen höher als 0,3, Wärmeleitfähigkeiten und Wärmeübergangskoeffizienten eher geringer als $3,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und $0,7 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ (vgl. z.B. [Ramming (2007)] Anhang 3). Die Abweichungen können durch die Beschränkung des Modells auf die bereits aufgezeigten Module erklärt

¹⁸Szenario Parameter53

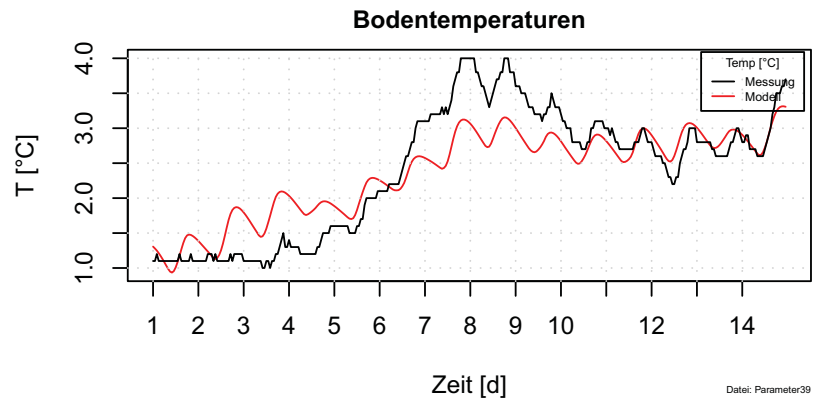


Abbildung 10.8.: Modellergebnisse für die erste Maiwoche mit den Parametern $\lambda_{Ob} = 2,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $R_{Ob} = 0,8 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$, $\epsilon=0,1$.

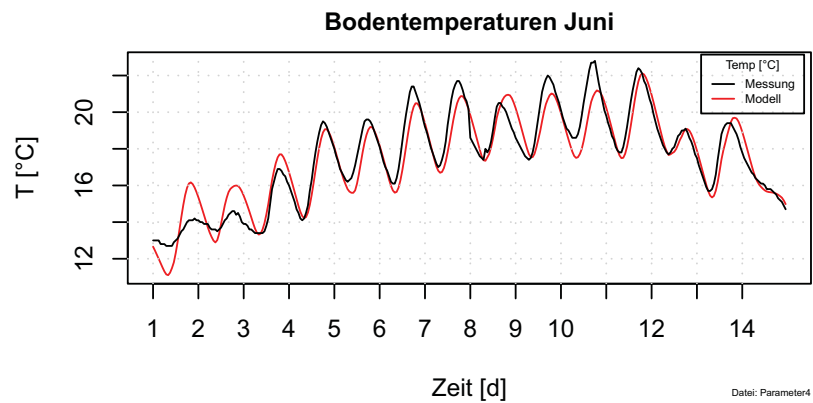


Abbildung 10.9.: Modellergebnisse für die ersten beiden Juniwochen mit den Parametern $\lambda_{Ob} = 1,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $R_{Ob} = 0,09 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$, $\epsilon=0,9$.

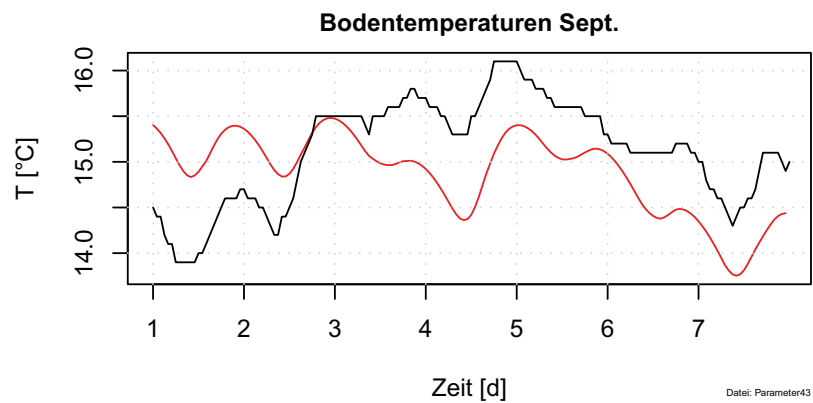


Abbildung 10.10.: Modellergebnisse für die erste Septemberwoche mit den Parametern $\lambda_{Ob} = 0,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $R_{Ob} = 0,3 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$, $\epsilon=0,3$.

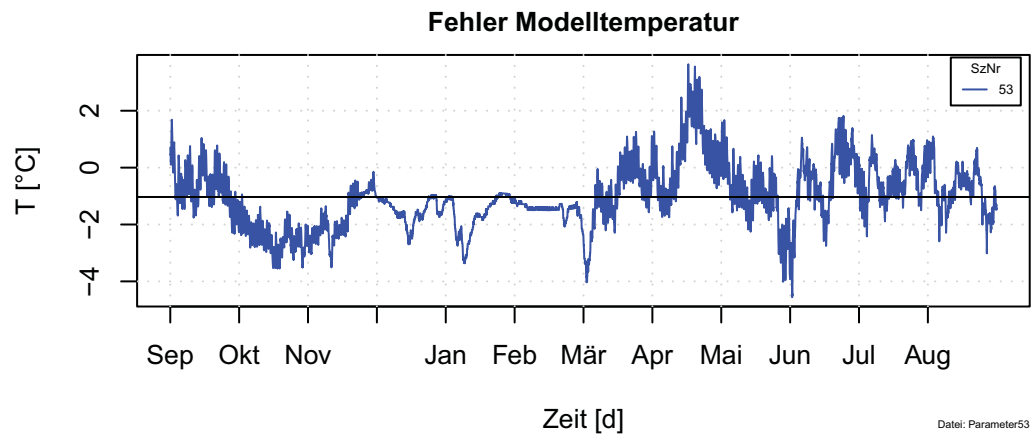


Abbildung 10.11.: Abweichung und mittlere Abweichung der Modelltemperatur für die gewählten Standardparameter.

werden. Physikalische Effekte wie Verdunstung, vertikale Wasserflüsse (nach Regen), Schneebedeckung, Bepflanzungssituation, Wind, Verschattung,... wurden im Modell nicht berücksichtigt. Diese Effekte korrelieren zum Teil mit den im Modell berücksichtigten Wärmetransportphänomenen. Die Korrelation führt zu den beobachtenden Modellparametern. Der Teil der Effekte der nicht mit den Modellmodulen korreliert führt zu den zu beobachtbaren Abweichungen zwischen Modell- und Messtemperaturen.

11. Szenarien

Im Bodenmodell wird die Auswirkung der Nutzung von Umweltwärme aus dem Boden untersucht. Dabei sollen vorwiegend drei Fragen beantwortet werden. Erstens: Ist die Nutzung von Wärmepumpen, im Besonderen die Nutzung von Umweltwärme aus dem Boden regenerativ? Zweitens: Hat der Entzug von Bodenwärme rückkoppelnde Auswirkungen auf das Wärmepumpensystem? Und drittens: Welche Auswirkung hat die zu erwartende Verbesserung der Gebäudestandards auf das System Wärmepumpe?

Die „globalen“ Auswirkungen der Nutzung von Wärmepumpen aufgrund des Bedarfs an elektrischer Energie wird beispielsweise in Schubert u. Kaschütz (2008) beschrieben.

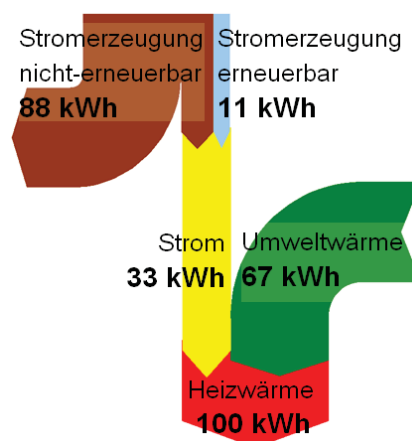


Abbildung 11.1.: Anteil des Stromes aus erneuerbarer bzw. nicht erneuerbarer Stromerzeugung. Quelle Schubert u. Kaschütz (2008).

Mit dem Bodenmodell sollen die lokalen Auswirkungen des Wärmebedarfs aufgrund des Entzugs von Umweltwärme beschrieben werden. Dabei beschränken sich die Untersuchungen auf den Wärmeaustausch mit dem Boden. Wärmepumpen die Oberflächen- oder Grundwasser bzw. die Luft als Wärmereservoir nutzen werden im Folgenden nicht betrachtet. Im Modell sollen die Auswirkungen der Wärmegewinnung bzw. der Wärmespeicherung aus und in Böden analysiert werden. Wenn möglich sollen effizientere Ansätze für eine etwaige saisonale Wärmespeicherung gefunden und dargestellt werden. Die Auswirkungen werden anhand mehrerer Modellszenarien beschrieben.

Die Modellnachfrage an Raumwärme und Wärme für die Warmwasserbereitung an die Wärmepumpe wird anhand der Wetterdaten LfL (2009) und eines sehr einfachen Gebäudemodells bestimmt. Zur

Berechnung der Wärmenachfrage wird ein Einfamilienhauses in den drei verschiedenen Dämmstandards, ohne besondere Dämmung (*EFH i*), im Niedrigenergiestandard (*EFH N*) und im Passivhausstandard (*EFH P*) berechnet. Der Aufbau des Gebäudes (*EFH i*) entspricht dem Gebäude EFH(i) aus Herrmann (2006)¹. Die Energiebezugsfläche der Gebäude beträgt 144 m². Der Wärmebedarf ergibt sich aus den spezifischen Lüftungs- und Transmissionsverlusten α_{TL} der thermischen Außenhülle des Modellhauses, den spezifischen solaren Gewinnen α_{sG} , den spezifischen internen Gewinnen von 22 kWh/(m²a) und der spezifischen Warmwassernachfrage von 12,5 kWh/(m²a). Das Temperaturniveau, welches die Wärmepumpe erreichen muss wird für die Raumwärmeerzeugung auf 40 °C, für die Warmwasserbereitstellung auf 70 °C festgelegt. Die drei Gebäude unterscheiden sich in den folgenden Merkmalen.

| | <i>EFH i</i> | <i>EFH N</i> | <i>EFH P</i> |
|--|--------------|--------------|--------------|
| α_{TL} [kW/K] | 0,165 | 0,080 | 0,05 |
| α_{sG} [W/(W m ²)] | 2,5 | 4,0 | 5,0 |
| Wärmebedarf [MWh/a] | 14,3 | 6,3 | 3,8 |
| spez. Wärmebed. [kWh/(m ² a)] | 99,0 | 43,8 | 26,6 |

Tabelle 11.1.: thermische Eigenschaften der Gebäude. Der Wärmebedarf beinhaltet den Bedarf für die Warmwassererzeugung.

In den Modellen wird zum Teil ein Solarkollektor mit der Kollektorfläche von 10 m² und einem Wandlungswirkungsgrad von Solarstrahlung in Wärme von 70% berücksichtigt. Für diesen Fall wird ebenso ein Pufferspeicher mit einer Kapazität von 50 kWh integriert. Die Wärme aus dem Solarkollektor wird in folgender Reihenfolge genutzt. Deckung des Warmwasserbedarfs, Deckung des Raumwärmebedarfs, Einspeicherung in den Pufferspeicher. Weitere überschüssige Wärme kann direkt in das Kollektorsystem der Wärmepumpe geführt werden. Die Wärme aus dem Pufferspeicher wird wiederum vorrangig für die Deckung der Warmwasser- dann zur Deckung der Raumwärmenachfrage genutzt.

Im Weiteren besteht die Möglichkeit „Kühlwärme“ über den Bodenkollektor in das Erdreich abzuführen. Der Kühlbedarf kann dabei durch die Gebäude- und Wetterparameter bestimmt werden.

Für die Bodenkollektoren werden ebenfalls verschiedene Systeme betrachtet. Zum einen wird ein Flächenkollektor verwendet. Dieser ist horizontal in 1 m Bodentiefe angebracht und hat eine Flächenausdehnung von 200 m². Als weitere Variante gibt es die Möglichkeit der Nutzung einer Bodensonde. Diese besteht aus einem vertikal angeordneten Fall- und Steigrohr. Die Sonde in den Szenarien hat eine Länge von 99 m.

Die zeitliche Auflösung der Modellszenarien ist 1 h. Die höchstmögliche räumliche Auflösung für die das Modell eine stabile Lösung liefert liegt nach Gleichung (9.81) mit den gewählten Bodenparametern bei ca. $|\Delta \vec{x}| = 10$ cm. Die Einflüsse des Wärmeentzugs sollen für ein Bodenvolumen von ca. 100 m x 100 m x 100 m untersucht werden. Hieraus ergibt sich die Anzahl der maximal möglichen Volumenelemente von 10⁹. Demzufolge müssen für die Modellierung eines Modelljahres mindestens 26 · 10¹² Rechenoperationen durchgeführt werden². Um die Modelle mit einem „normalen“ PC berechnen zu können wurde versucht die Anzahl der Volumenelemente um ein Vielfaches zu reduzieren. In *z*-Richtung des Modells wurde diesbezüglich mit zunehmender Bodentiefe die Schichtdicke

¹ Kapitel 7.2.1. Einfamilienhaus, Seite 90

² je Volumenelement 8760 h/a & 3 Raumrichtungen

Δz der Ebenen deutlich erhöht. Im oberflächennahen Bereich wurde eine Schichtdicke von 0,2 m gewählt, die unterste Schicht wurde mit einer Dicke von 23,0 m veranschlagt. In x - bzw. y -Richtung variieren die Schichtdicken zwischen 1 m und 20 m. Im Weiteren werden die Symmetrien die sich durch die Randbedingung $\Delta Q = 0$ ergeben ausgenutzt. Für die folgenden Szenarien wird jeweils nur der Quadrant in positiver x - und y -Richtung und in negativer z -Richtung berechnet. Diesbezüglich muss jeweils der Mittelpunkt des Flächenkollektors bzw. Längsachse der Erdsonde auf der z -Achse liegen.

Für alle folgenden Szenarien werden jeweils zwei Simulationen parallel berechnet. Ein Simulationslauf berechnet die Temperaturen im Boden unter Berücksichtigung des Wärmeentzugs durch die Wärmepumpe. Parallel dazu wird das gleiche Modell ohne Wärmeentzug durch den Kollektor simuliert. Die Auswirkungen des Wärmeentzugs werden als Differenz zwischen den beiden Szenarien wiedergegeben und dargestellt, beispielsweise $\Delta T_{\text{Boden}}(\vec{i}, t) = \Delta T_{\text{Boden mit WP}}(\vec{i}, t) - \Delta T_{\text{Boden ohne WP}}(\vec{i}, t)$.

Durch die Symmetrien in der Modellierung ergibt sich ein periodisches System. Auf Grund der Periodizität des Modells können die Auswirkungen des Wärmeentzugs durch die Wärmekollektoren einer gesamten (symmetrisch angeordneten) Siedlung anhand der Simulation eines einzigen Wärmekollektors bestimmt werden. Die Länge X bzw. Y des gesamten betrachteten Bodenvolumens des Modells entspricht dabei der halben Entfernung zwischen den (periodisch angeordneten) Kollektoren einer betrachteten Siedlung. Durch eine Vergrößerung des betrachteten Bodenvolumens liegt die Symmetrieebene in größerer Entfernung vom Kollektor. In den folgenden Modellen wird davon ausgegangen, dass für eine Entfernung einer vertikalen Ebene vom Kollektor, in der die Temperaturabweichung $\Delta T_{\text{Boden}}(\vec{i}, t)$ für alle modellierten Zeitschritte kleiner als $0,1^\circ\text{C}$ ist, keine Auswirkung des Wärmeentzugs auf diese Ebene besteht. Für Szenarien in denen die Symmetrieebene weiter entfernt liegt als diese Ebene spielt die Periodizität des Modells eine zu vernachlässigende Rolle.

Die Anfangsbedingungen für das Modell werden durch eine Simulation der Wärmeflüsse im Boden über 100 Modelljahre ermittelt.

Für die Auswertung und Darstellung der Modellergebnisse werden für jedes Modellszenario drei Datensätze in Form von Dateien erstellt. Dabei erhält eine Datei sämtliche Rahmenbedingungen und Anfangsparameter, eine sämtliche Wärmeflüsse zwischen den Unterschiedlichen Medien³ pro Zeitschritt τ . Die dritte Datei enthält die Temperaturen für jedes Bodenelement. Um die Datenflut in letzterer beherrschbar zu lassen wird hier auf die zeitliche Auflösung der Speicherung und der späteren Darstellung auf 5 Tage reduziert⁴. Die Dargestellten und Ausgewerteten Modelltemperaturen sind somit Durchschnittstemperaturen für je 5 Tage. Extremtemperaturen werden durch die Mittelwertbildung stark unterdrückt. Sämtliche Daten werden mittels der Programmiersprache „R“ ausgewertet.

³Boden, Luft, Kollektor,... Es werden jedoch nicht die Wärmeflüsse zwischen den einzelnen Volumelementen im Boden gespeichert

⁴Bei den Szenarien mit Flächenkollektor hat der Boden eine Auflösung von $11 \cdot 6 \cdot 13 = 858$ Volumelemente. Für jeden Zeitschritt müssen pro Volumelement die beiden Temperaturen mit und ohne Wärmepumpe gespeichert werden. Die Variablen haben den Typ Double (8 Bytes). Daraus ergibt sich ein Speicherbedarf von 10,37 kB pro Datensatz. Bei einer zeitlichen Auflösung von 1h benötigt man pro Simulationsjahr einen Speicherbedarf von 120 MB, bei 35 Jahren 4,2 GB. Durch die Reduktion der zeitlichen Auflösung auf 5 Tage kann der Speicherbedarf pro Jahr auf ca. 1 MB reduziert werden.

11.1. horizontaler Flächenkollektor

11.1.1. EFH i Koll

Der Modellzeitraum des dargestellten Szenarios ist 35 Jahre. Davon ist in den ersten 30 Jahren die Wärmepumpe und der Wärmekollektor in Betrieb⁵. Im Anschluss werden 5 Regenerationsjahre ohne Wärmeentzug simuliert. Die Modelle werden jeweils beginnend mit der Heizsaison simuliert. Startzeitpunkt für die Simulation ist der 1. September. Um die Auswirkung von differierenden klimatischen Verhältnissen unterschiedlicher „Wetter“-Jahre zu umgehen wurden jeweils periodisch die Daten eines einzigen Wetterjahres für die Modellierungen verwandt. Der Datensatz beginnt mit Mittelwerten für den Zeitraum 1. September 1998, 0:00 - 1:00 Uhr.

Abbildung 11.2 zeigt den Wärmebedarf des Modellhauses pro Tag und den entsprechenden Wärmebezug nach Gleichung (10.15), der über den Bodenkollektor dem Erdreich entzogen wird.

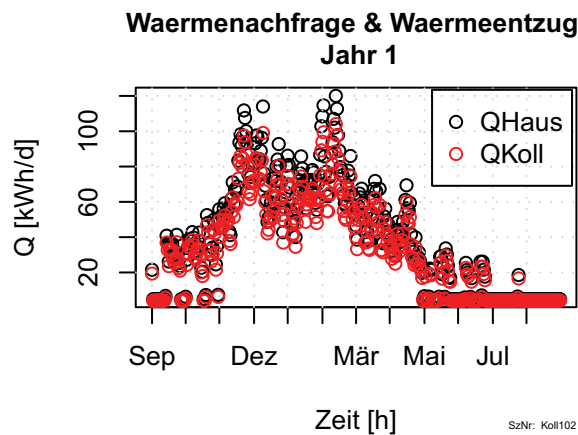


Abbildung 11.2.: Tages-Wärmenachfrage des Modellhauses (Q_{Haus}) und am Kollektor (Q_{Koll}) für ein Jahr.

Das modellierte Bodenvolumen hat eine Gesamtvolumen von $381\,150\text{ m}^3$ bei einer Bodenoberfläche von 3465 m^2 . Der Absorption- bzw. Emissionskoeffizient der Bodenoberfläche ist 0,3, der Wärmeübergangswiderstand $0,7\text{ K m}^2\text{ W}^{-1}$. Die Bodenfeuchte wird auf 25 Massenprozent festgelegt. Der simulierte Bodenkollektorfläche ist 20 m lang (in y -Richtung) und 10 m breit. Der Kollektor ist in einer Bodentiefe von 1,0 m installiert (Umrahmte Bereiche in Abbildungen 11.3).

Im Simulationslauf werden vom Kollektor im Jahresmittel $10\,603\text{ kWh/a}$ (86,7% der im Gebäude nachgefragten Nutzwärme) mittels Wärmepumpe dem Boden entzogen. Die spezifische Entzugskapazität des Kollektors liegt bei $26,2\text{ W m}^{-2}$. Die flächenspezifische Entzugsleistung nach VDI (2001) liegt für bindigen Boden im Bereich zwischen 20 und 30 W/m^2 .

Der Wärmeentzug im Boden durch den Kollektor führt während der Heizsaison zu einer Verringerung der Bodentemperatur im Kollektorbereich und in dessen Umgebung (Abbildungen 11.3). Aufgrund

⁵in den Folgemodellen auch die Kühlung und der Solarkollektor

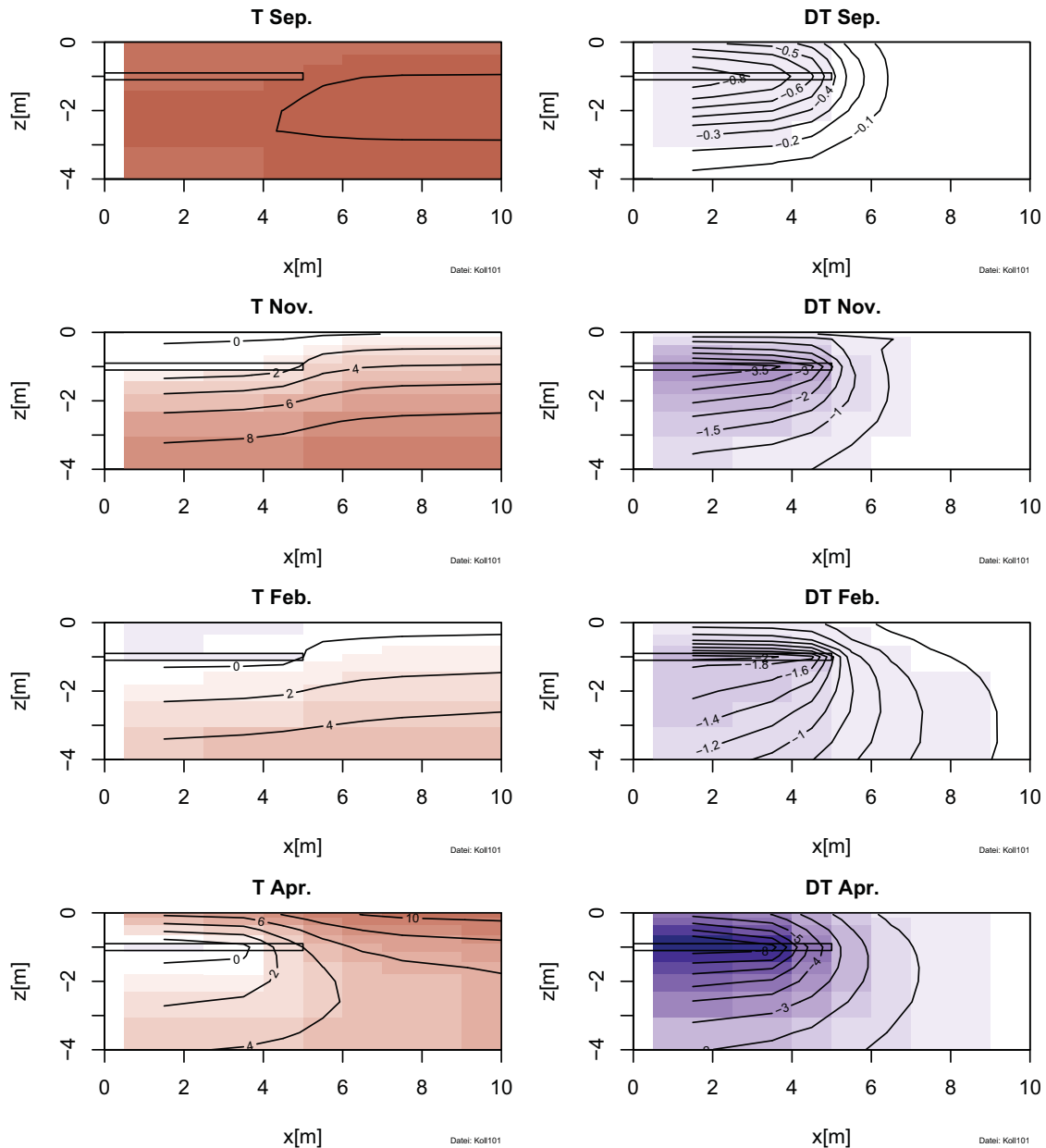


Abbildung 11.3.: Jeweils links: Bodentemperatur T in der $x-z$ -Ebene jeweils Ende September, November, Februar und April des ersten Simulationsjahres. Temperaturen oberhalb von 0 °C sind rot dargestellt, unterhalb blau. Jeweils rechts: Reduktion der Temperaturen ΔT zum unbelasteten Fall. Die Umrandung in 1 m Tiefe zeigt die Lage des Kollektors. Durch das Zentrum des Kollektors verläuft, aufgrund der Symmetrie eine senkrechte Spiegelachse. Der Ursprung des Koordinatensystems ist in den Schnittpunkt zwischen Spiegelachse und Bodenoberfläche gelegt. Dargestellt ist ein Schnitt durch den Boden bei $y = 0$ m. Aufgrund der Symmetrie ist jeweils nur die rechte Hälfte der Ebene simuliert und dargestellt.

des Wärmeentzugs ist der Kollektorbereich an 120 376 Stunden im Modellzeitraum gefroren (entspricht 167 Tage pro Jahr). Niedrigste Temperatur⁶ in der Kollektorebene ist -1 °C im 7. Monat des 30. Simulationsjahres (Wetterdaten vom 24.03.1999 23:00:00). Durch den entstehenden Temperaturgradienten im Boden fließt Wärme aus der Umgebung des Kollektors nach. Dieses Nachfließen der Wärme führt zu einer zu geringeren Oberflächentemperaturen oberhalb des Kollektors, zum anderen zur Ausbildung eines „Kälte Lochs“ unterhalb des Kollektors (Abbildung 11.4, August).

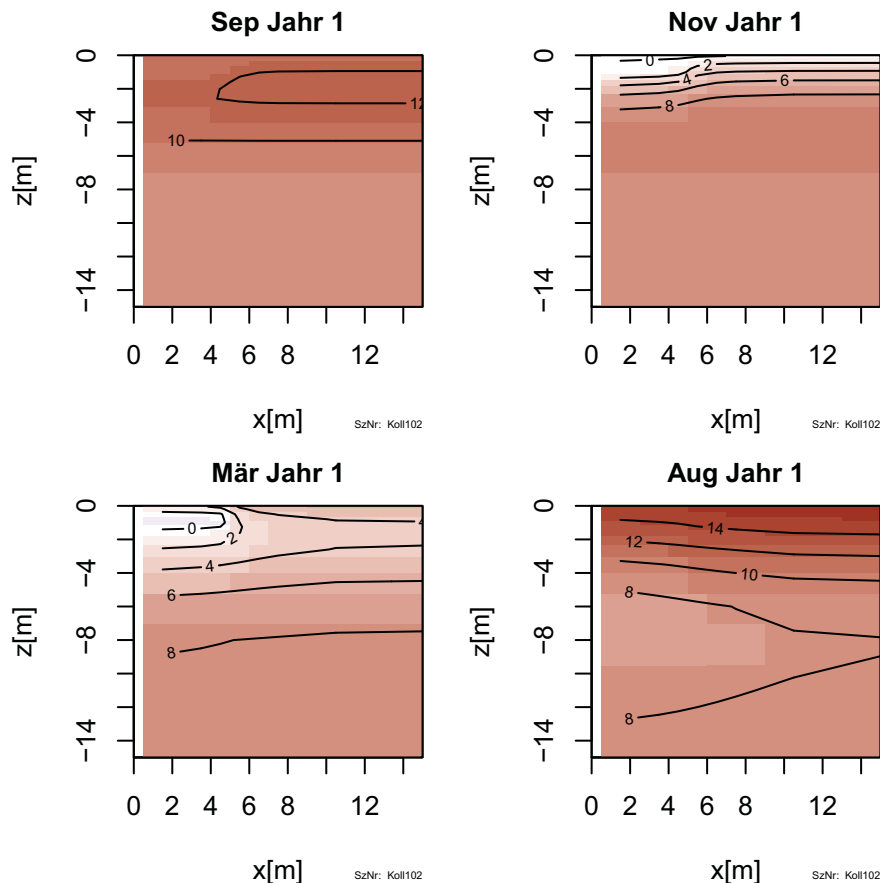


Abbildung 11.4.: Bodentemperatur in der x-z-Ebene jeweils Ende September, November, März und August des ersten Simulationsjahres.

In Abbildung 11.5 ist der zeitliche Verlauf der Bodentemperaturen im Kollektorbereich gezeigt. Für die 30 Betriebsjahre⁷ wird der Boden in der Kollektorebene zu Beginn der Heizperiode⁸ bis zum Gefrierpunkt abgekühlt. Während des Winters wird im Modell die latente Wärme der Bodenfeuchte als weiteres Wärmereservoir genutzt. Der Boden bleibt in Kollektornähe bis in den Mai gefroren. In der Kollektorebene kommt es nicht zu einer fortschreitenden Reduktion der Bodentemperaturen über die Jahre. Nach Beendigung des Betriebs der Wärmepumpe⁹ regenerieren sich die Bodentemperaturen

⁶5-Tage Durchschnittstemperatur

⁷untere Temperaturverläufe in Abbildung 11.5

⁸Herbst bis etwa Ende November

⁹nach 30 Jahren

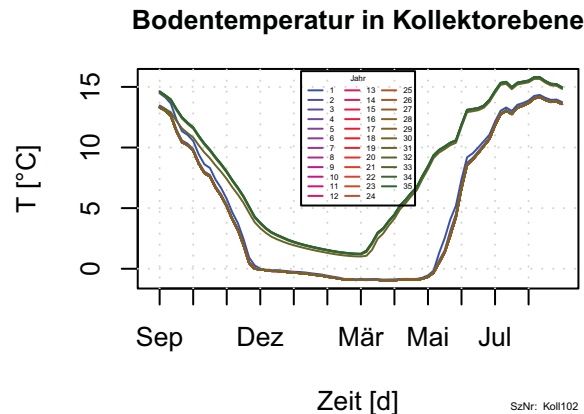


Abbildung 11.5.: Bodentemperatur in der Kollektorebene während der 30 Betriebsjahre und den 5 anschließenden Regenerationsjahren.

in der Kollektorebene rasch und folgen dem natürlichen Jahresgang¹⁰.

Wie beschrieben bleibt der Boden im Bereich des Kollektors aufgrund des Wärmeentzugs bis Mai gefroren. Im unbelasteten Fall erreicht der Boden in einer Tiefe von 1 m bereits im März die Tiefsttemperatur und beginnt sich anschließend wieder zu erwärmen. Dies führt dazu, dass es im Besonderen im Frühsommer zu einem deutlichen Unterschied in den Bodentemperaturen für die Fälle mit bzw. ohne Bodenkollektor kommt (Abbildung 11.6). Die größte Reduktion der Kollektortemperatur ist -9,7 °C im 9. Modellmonat des 30. Jahres (Wetterdaten vom 08.05.1999 23:00:00).

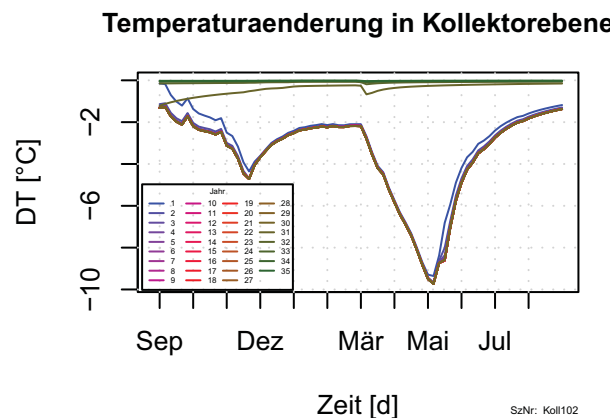


Abbildung 11.6.: Änderung der Bodentemperatur in der Kollektorebene aufgrund des Wärmeentzugs während 30 Betriebsjahren und anschließend 5 Regenerationsjahren.

Die Abbildungen 11.7 und 11.8 zeigen den Verlauf der Bodentemperaturen im Bereich des Kollektors in Abhängigkeit der Bodentiefe je für Ende März und Ende August. Während sich im März eine deutliche Reduktion der Bodentemperaturen in der Kollektorebene zeigt ergibt sich im August eine

¹⁰ obere Linien in Abbildung 11.5

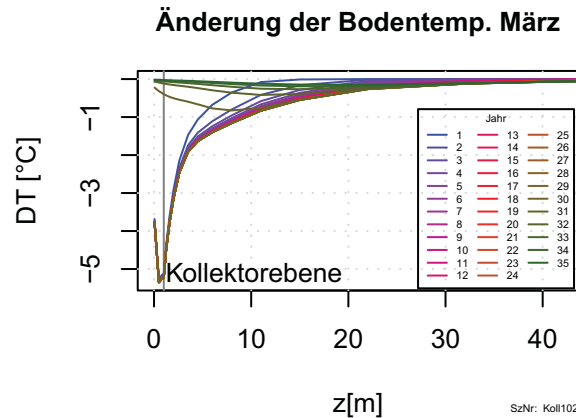


Abbildung 11.7.: Verringerung der Bodentemperatur im Kollektorbereich aufgrund des Wärmeentzugs jeweils gegen Ende einer Heizsaison (je letzter Modelltag im März).

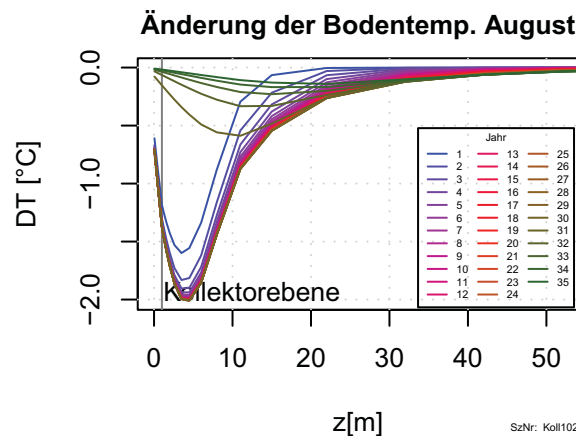


Abbildung 11.8.: Verringerung der Bodentemperatur im Kollektorbereich aufgrund des Wärmeentzugs jeweils zum Ende eines Modelljahres (je letzter Modelltag im August).

Reduktion in tiefer gelegenen Bodenschichten. Diese Reduktion liegt bei einer Größenordnung von 1,5 - 2°C und nimmt sowohl in Höhe, als auch in der räumlichen Ausbreitung sukzessive über die Betriebsjahre zu. Die größte Reduktion der Bodentemperatur unterhalb des Kollektors am Ende einer Heizperiode ist -2 °C in 3,5 m Tiefe am Ende der 30. Heizperiode. Die Bodentemperatur ist nach 30 Heizperioden bis in eine Tiefe von ca. 50 m um mehr als 0,1 °C geringer als für den Fall ohne Wärmekollektor. Nach dem Ende des Betriebs des Kollektors zerfließt das Kälte Loch im Boden.

Die Änderung der Bodentemperatur im Kollektorbereich im Jahresverlauf (Abbildung 11.5) führt zu veränderten Rahmenbedingungen für die Wärmepumpe. Während des Jahres variiert somit die Leistungszahl_{Car}¹¹ der Wärmepumpe mit der Bodentemperatur (Abbildung 11.9). Die starken Sprün-

¹¹im Folgenden werden zwei verschiedene Werte für die Leistungszahl angegeben. Die Leistungszahl_{Car} (kurz COP_{Car} mit COP als coefficient of performance) ist die, durch die nach dem linkslaufenden Carnotprozess maximal erreichbare Ausbeute an nutzbarer Wärme im Verhältnis zur eingesetzten mechanischen Energie. Als Leistungszahl_{real} oder nur

ge der Leistungszahl_{Car} sind durch die unterschiedlichen Temperaturniveaus der Raumwärme- und Warmwassernachfrage zu erklären.

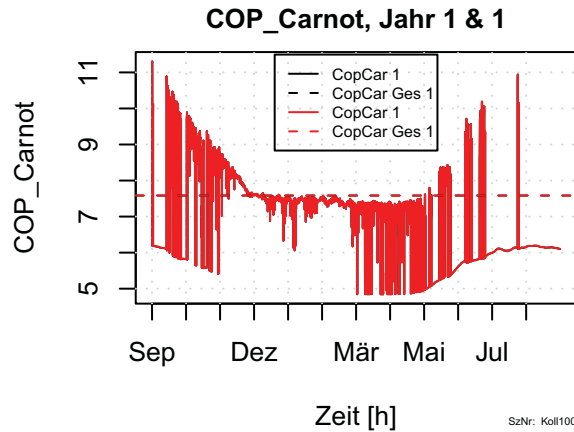


Abbildung 11.9.: Leistungszahl_{Car} und Jahresarbeitszahl_{Car} während des ersten Betriebsjahres.

Die Verringerung der Bodentemperatur in der Kollektorebene führt teilweise zu einer Verringerung der Oberflächentemperatur über dem Kollektor (Abbildung 11.10) was wiederum zu einer verstärkten

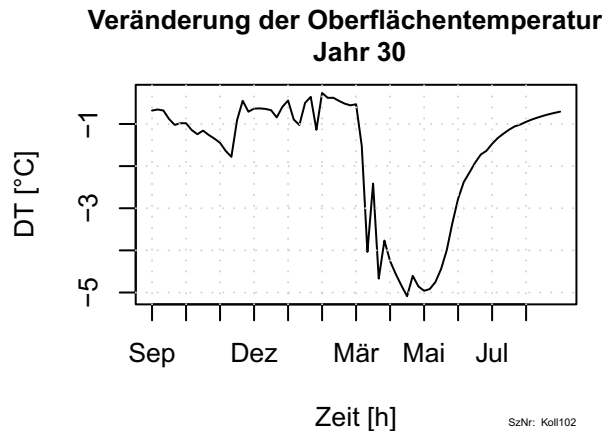


Abbildung 11.10.: Veränderung der Oberflächentemperatur über dem Kollektor aufgrund des Wärmeentzugs im letzten Modelljahr.

Aufnahme an Wärme aus der Luft bzw. zu einer verringerten Abstrahlung von Wärme führt (Abbildung 11.11). Durch diesen Effekt des verstärkten Wärmeflusses durch die Bodenoberfläche oberhalb des Wärmekollektors kommt es zu einer Regeneration der Bodentemperaturen. Dementsprechend wird somit ein Teil der dem Boden entzogenen Wärme, mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung, aus der Atmosphäre gewonnen.

Leistungszahl wird die Ausbeute an nutzbarer Wärme im Verhältnis zum eingesetzten elektrischen Strom angegeben. Dabei wird im Folgenden standardmäßig von einem Wirkungsgrad der Wärmepumpe von 50% ausgegangen. Ein Teil dieser Verluste der Wärmepumpe resultiert aus Strömungs- und Reibungsverlusten die im Allgemeinen wieder als Wärme dem System zur Verfügung steht. Dies wurde hier nicht berücksichtigt. Die Leistungszahl_{real} ergibt sich somit im Modell als $0,5 \cdot \text{Leistungszahl}_{\text{Car}}$.

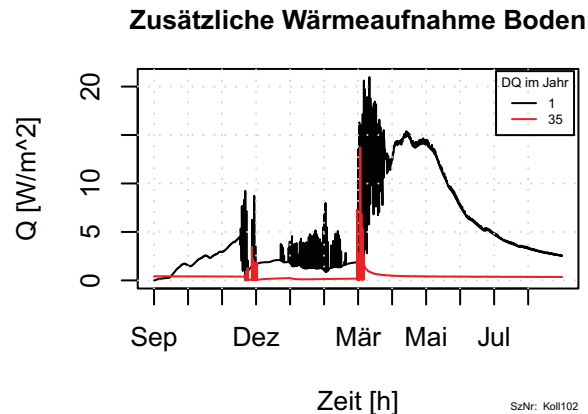


Abbildung 11.11.: Zusätzliche Wärmeaufnahme des Bodens aus der Luft aufgrund der verringerten Oberflächentemperaturen (im ersten Betriebsjahr der Wärmepumpe und nach 5 Jahren Regenerationszeit).

Abbildung 11.12 zeigt den Wärmeaustausch über die Bodenoberfläche für den Fall mit bzw. ohne Wärmepumpe und deren Differenz für das erste Betriebsjahr. In allen Monaten, besonders aber ab März ergibt sich beim Betrieb des Kollektors aufgrund der verringerten Oberflächentemperaturen eine zusätzliche Wärmeaufnahme aus der Umgebungsluft in den Boden. Dies führt zu einer teilweisen Regeneration der Bodentemperatur. Aufgrund dieses erhöhten Wärmenachflusses bei sinkenden Bodentemperaturen kommt es zu einer Kompensation des Wärmeentzugs durch den Kollektor. Dies hat zur Folge, dass die Bodentemperaturen in Kollektorebene nur solange über die Jahre sinken bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Dies führt zu einem gleichbleibenden Jahrestemperaturverlauf und somit zu einer asymptotischen Annäherung der Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe an einen Gleichgewichtswert (Abbildung 11.13). In dem modellierten Zeitraum von 30 Betriebsjahren sinkt die Jahresarbeitszahl_{Car} mit den gewählten Boden- und Hausparametern unmerklich von 7,58 im ersten Jahr um weniger als 0,7% auf 7,54 im letzten Jahr. Dies führt über die Jahre zu einer geringfügig¹² ansteigenden Aufnahme an elektrischer Energie für den Betrieb der Wärmepumpe (Abbildung 11.14).

Wie bereits beschrieben führt der Wärmeentzug durch die Wärmepumpe zu einer steigenden Abkühlung des Bodens unterhalb des Bodenkollektors. Abbildung 11.15 zeigt die Veränderung des Wärmeinhalts im Boden über die Jahre aufgrund des Wärmeentzugs. Es zeigt sich, dass dem Boden nicht regenerativ¹³ Wärme entzogen wird.

Im Weiteren wird betrachtet welchen Quellen die pro Jahr über den Kollektor gesammelte Wärme im entsprechenden Jahr entzogen wurde. Abbildung 11.16 zeigt den Anteil der Wärme am Wärmeentzug, der pro Jahr über die Bodenoberfläche aus der Luft regeneriert wird. Der nicht aus der Luft nachfließende Teil der Wärme wird aus tieferen Lagen im Boden entzogen (Abbildung 11.17). Bis zum Ende des Wärmepumpenbetriebs von 30 Jahren beträgt der mittlere Anteil der nichtregenerativen Bodenwärme 6,1% bezogen auf den jährlichen Umweltwärmebedarf.

¹²um 0,4%

¹³in einer Zeitskala von einigen Jahren



Luft aufgenommenen Wärmemenge bei Betrieb der Wärmepumpe.



Abbildung 11.13.: Verlauf der Jahresarbeitszahl COP (Carnot) in Abhängigkeit der Laufleistung.

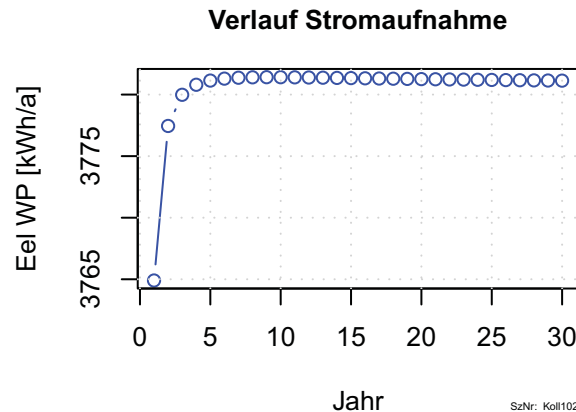


Abbildung 11.14.: Aufnahme an elektrischer Energie für den Betrieb der Wärmepumpe über die Betriebsjahre.

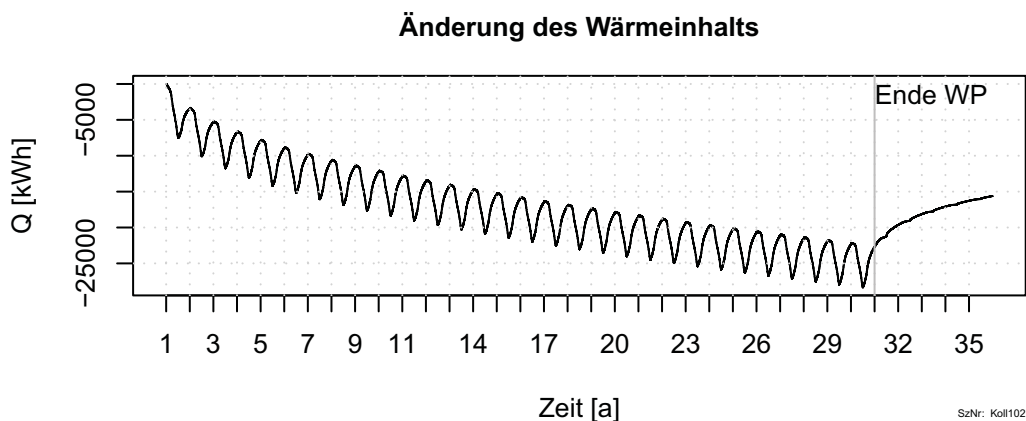


Abbildung 11.15.: Veränderung des Wärmeinhalts des Bodens aufgrund des Wärmeentzugs der Wärmepumpe.

Vom Kollektor werden im Modell 10 603 kWh/a an Umweltwärme (86.7% der Wärmenachfrage des Hauses) mittels Wärmepumpe dem Boden entzogen. Bei einem angenommenem Wärmepumpenwirkungsgrad η_{el} von 50% werden dazu 3781 kWh/a an elektrischer Energie benötigt. Unter Berücksichtigung eines Primärenergiefaktors des deutschen Strommix¹⁴ von 2,72 ergibt sich somit eine Primärenergienachfrage von 10 283 kWh/a¹⁵ bzw. 37 019 MJ/a. Bei spezifischen CO₂-Emissionen des deutschen Strommix von 624 g/kWh [UBA (2010)]¹⁶ werden pro Jahr 2359 kg an CO₂ emittiert.

Eine Gasheizung hat im Vergleich dazu bei einem Wirkungsgrad von 80% bzw. 95% (H_O)¹⁷ einen Primärenergiebedarf zwischen 15 011 kWh/a (54 040 MJ/a) und 17 826 kWh/a (64 172 MJ/a). Daraus resultieren bei spezifischen CO₂-Emissionen von Erdgas von 200 g/kWh Emissionen zwischen 3002

¹⁴ siehe Anhang, Abschnitt 12.2.3

¹⁵ 71,4 kWh/(m²a)

¹⁶ Jahr 2003

¹⁷ bezogen auf den Brennwert (H_O), bzw. 89% bzw. 105% bezogen auf den Heizwert (H_U)

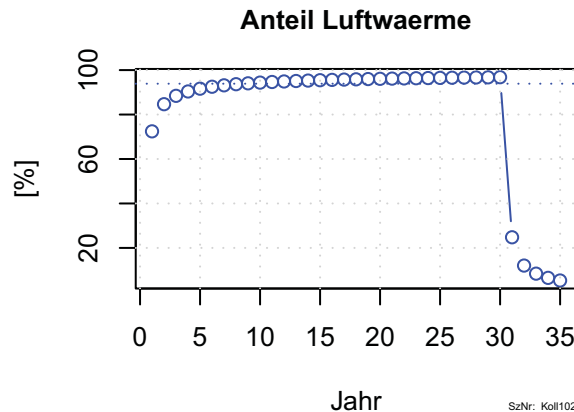


Abbildung 11.16.: Aufnahme von Wärme aus der Luft zur Regeneration der Bodentemperaturen und Mittelwert.

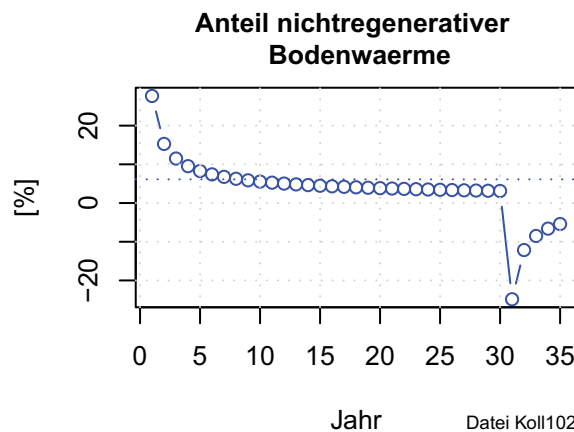


Abbildung 11.17.: Anteil der nicht regenerativen Bodenwärme und Mittelwert.

und 3565 kg/a.

Die Mittlere Jahresarbeitszahl $_{Car}$ der Wärmepumpe beträgt 7,5. Mit 50% elektrischem Wirkungsgrad der Wärmepumpe ergibt sich eine Jahresarbeitszahl $_{real}$ von 3,75.

Für die gewählten Boden und Hausparameter ergibt sich, dass der Entzug an Bodenwärme mittels Kollektor als nahezu regenerativ gesehen werden kann. Ein Großteil der dem Boden entzogenen Wärme wird über eine erhöhte Aufnahme an Luft- und Strahlungswärme bereits in kurzen Zeitskalen wieder kompensiert. Die Auswirkungen der verringerten Bodentemperaturen auf die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe sind ebenso eher als gering einzuschätzen. Ab einer Entfernung von 15 m vom Rand des Kollektors sind selbst nach 30 Jahren der Nutzung die Bodentemperaturen um weniger als 0,1°C reduziert. Somit zeigt sich nahezu keine Wirkung von Bodenkollektoren aufeinander, wenn sie mehr als 30 m voneinander entfernt sind. Hieraus ergibt sich ein maximaler spezifischer Flächenentzug für nicht überbaute Flächen von 5 kWh/(a m²).

11.1.2. EFH i Koll Sol bzw. EFH i Koll Kühl

¹⁸Es soll betrachtet werden, ob die Einspeisung von Solarwärme bzw. sommerlicher Kühlwärme aus dem Gebäude in den Boden einen Einfluss auf die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe hat. Dazu werden zwei weitere Modelle mit 15 Jahren Betriebszeit der Wärmepumpe und 2 Regenerationsjahren¹⁹ simuliert. Im Modell (*EFH i Koll Sol*)²⁰ wird Globalstrahlung mit einem Wirkungsgrad von 0,7 mittels eines 10 m² Solarkollektors aufgenommen. Diese Solarwärme wird vorrangig erst zur Warmwasserbereitung dann zur Heizungsunterstützung verwendet. Überschüssige Wärme wird in einen Warmwasserspeicher überführt. Bei gefülltem Speicher wird die Restwärme über den Bodenkollektor in den Boden gespeichert. Abbildung 11.18 zeigt den Verlauf der Wärmenachfrage über das Jahr. An Tagen

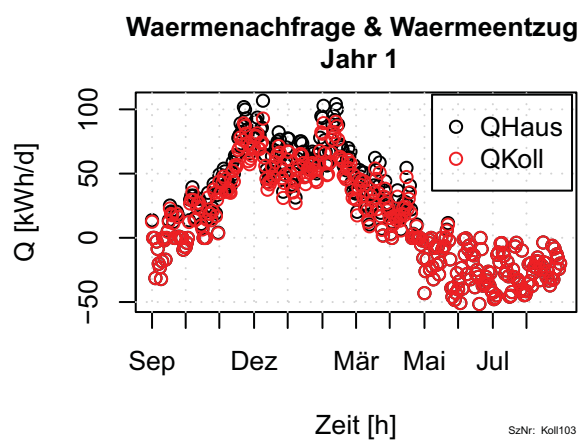


Abbildung 11.18.: Wärmeentzugs (positiv) bzw. der Wärmeeinspeisung (negativ).

mit negativer Wärmenachfrage wird Wärme²¹ über den Erdkollektor an den Boden abgegeben.

Abbildung 11.19 zeigt die Ausbreitung der Kälte bzw. Wärme im Boden.

Mit steigendem Angebot an Sonneneinstrahlung kann der Boden in der Kollektorebene ab ca. Mai erwärmt werden. Am Ende des Modell-Heizjahres (August) ist der Boden um den Kollektor um über 1°C erwärmt (Abbildung 11.20). Bereits im Oktober ist im Modell die gespeicherte Wärme wieder entzogen, bzw. zerflossen.

Durch die Nutzung von Solarwärme zur Warmwasser- bzw. Raumwärmenachfrage ergibt sich ein stark unterschiedliches Anforderungsprofil an die Wärmepumpe. Die Raum- und Warmwasserwärmenachfrage des Hauses sinkt um 25,1% von 14,3 MWh/a auf 10,7 MWh/a (von 99,0 kWh/(m²a) auf 74,4 kWh/(m²a)). Im Sommer wird größtenteils keine Wärme nachgefragt. Während der Heizsaison ist der Anteil der Wärmenachfrage zur Warmwasser Aufbereitung eher gering. Aus diesem Grund kann die Wärmepumpe mit höherer Leistungszahl betrieben werden. Die Abbildungen 11.21 und 11.22 zeigen den Verlauf der Leistungszahl im Jahresverlauf bzw. den Verlauf der Jahresarbeitszahl über die Jahre.

¹⁸SzNr: Koll103 mit Solarkollektor bzw. Koll104 mit Einspeisung Kühlwärme

¹⁹Verkürzung der Simulationszeiten aufgrund der Reduktion der Rechenzeiten des Modells. Ein Gleichgewichtszustand der Temperaturen in Kollektorebene hat sich bereits nach wenigen Jahren eingestellt.

²⁰SzNr: Koll103

²¹die nicht im Pufferspeicher eingespeichert wird



47 684 kWh (3179 kWh/a bzw. 40,2% der Wärmenachfrage des Bodenkollektors) werden durch die sommerliche Wärme aus dem Solarkollektor in den Boden rückgeführt. Ebenso wie im Szenario ohne

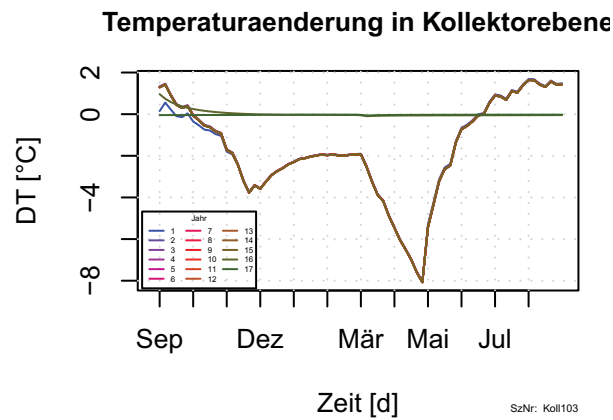


Abbildung 11.20.: Zeitlicher Verlauf der Änderung der Temperatur in der Kollektorebene.

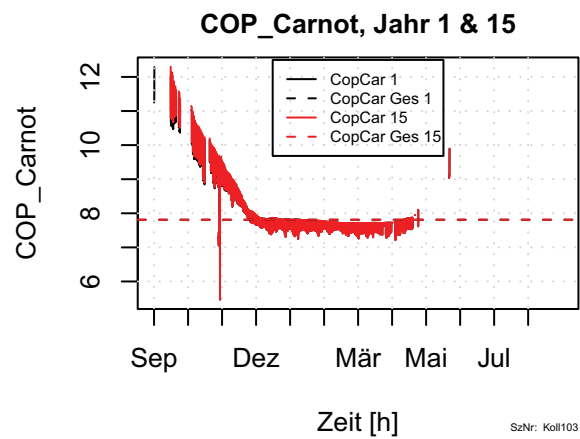


Abbildung 11.21.: Leistungszahl_{Car} für das erste bzw. 15. Betriebsjahr.

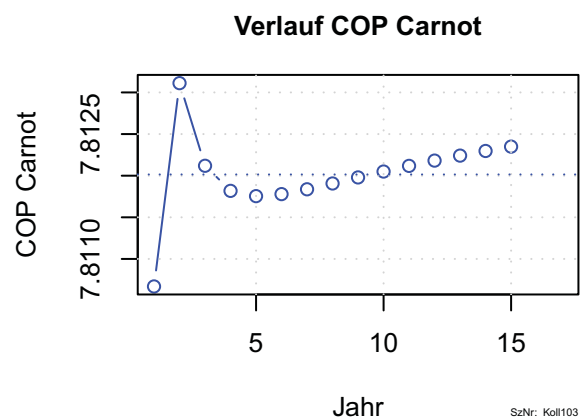


Abbildung 11.22.: Kollektortemperatur und rechnerischer COP (Carnot).

Solarkollektor wird darüber hinaus ein großer Teil der entzogenen Wärme über die Bodenoberfläche in den Boden rückgeführt. Der Anteil der nichtregenerativen Bodenwärme an der durch den Kollektor entzogenen Wärme bis zum Ende des Wärmepumpenbetriebes nach 15 Jahren liegt bei 4,8%, bis zum Ende des Modellszenarios bei 4,0%²². Die Mittlere Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe kann durch die geänderte Wärmenachfrage und die Wärmeeinspeisung in den Boden von 7,5 (3,8)²³ auf 7,8 (3,9) gesteigert werden. Dies ist vornehmlich dem geschuldet, dass der Anteil an mit der Wärmepumpe zu erzeugendem Warmwasser durch die Solarwärme reduziert werden kann. Somit muss weniger Wasser auf das, mit höherem Exergieaufwand verbundene Temperaturniveau von 70°C erwärmt werden. Die geringfügige Erhöhung der Bodentemperatur und somit des unteren Temperaturniveaus für die Wärmepumpe spielt nahezu keine Rolle. Die im Sommer in den Boden eingespeiste Wärme „zerfließt“ nach einer kurzen Zeitperiode. Es stellt sich nahezu keine Speicherwirkung für Wärme ein. Die in den Boden eingespeicherte Solarwärme kompensiert vornehmlich den natürlichen Wärmestrom der über die Bodenoberfläche in den Boden zurück fließt. Trotz der aktiven Wärmerückspeisung in den Boden ergibt sich bei den gewählten Parametern ein „Kälte Loch“ unterhalb des Kollektors.

Im Szenario (*EFH i Koll Kühl*)²⁴ wird dem Gebäude im Sommer zur Kühlung Wärme entzogen und in den Boden gespeichert. Aus den Wetter- und Gebäudestandarddaten ergibt sich die anfallende Kühllast in den Sommermonaten. Die Kühllast eines Jahres beträgt für dieses Modellgebäude 1068 kWh/a oder 7,5% der nachgefragten Wärme des Jahres.

Aus der Simulation ergibt sich die Jahresarbeitszahl zu 7,6 (3,8). Pro Jahr werden von der Wärmepumpe 3773 kWh an Strom benötigt, eine Reduzierung zum Fall ohne Einspeisung von Kühlwärme in den Boden von 8 kWh pro Jahr. In sämtlichen Szenarien bleibt der mechanische bzw. elektrische Energieaufwand für Rückspeisung von Wärme unberücksichtigt. Dies führt zu einem zusätzlichen Energiebedarf der bislang nicht berücksichtigt wurde.

Die Einspeisung von Kühlwärme aus dem Gebäude in den Boden hat, bei den gewählten thermischen Eigenschaften des Gebäudes (*EFH i*) weder einen ausschlaggebenden Einfluss auf den Anteil der regenerativ entzogenen Bodenwärme als auch auf die Jahresarbeitszahl.

11.1.3. Zusammenfassung

In den drei beschriebenen Szenarien kann durch den Einsatz der Wärmepumpe im Vergleich gegenüber einer Versorgung mittels einer Gasheizung der Primärenergiebedarf deutlich gesenkt werden. Abbildung 11.23 zeigt die Reduktion an Primärenergie bzw. an CO₂-Emissionen bezogen auf ein Referenzszenario. Die Referenz stellt eine Gasheizung mit einem Wirkungsgrad von 100%²⁵ dar. Das Referenzszenario mit Gasheizung hat für das Gebäude *EFH i* einen Primärenergiebedarf²⁶ von 15,9 MWh/a und produziert einen Ausstoß von 3169 kg/a an Kohlendioxid. Für das Szenario mit Solarkollektor wird ebenfalls die Konstellation Gasheizung + Solarkollektor mit der Referenz²⁷ verglichen.

²²nach 17 Jahren

²³Jahresarbeitszahl_{Car}, (Jahresarbeitszahl_{real})

²⁴SzNr: Koll104

²⁵bezogen auf den Heizwert, 90% bezogen auf den Brennwert

²⁶hier Gasbedarf

²⁷nur Gasheizung ohne Solarkollektor

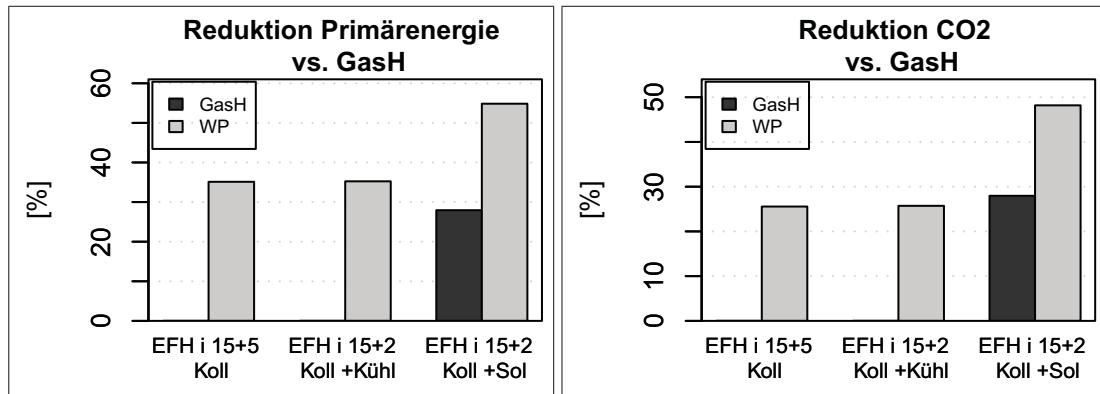


Abbildung 11.23.: Links: Reduktion des Primärenergiebedarfs im Vergleich der Szenarien mit Flächenkollektor (Koll) und Wärmepumpe (WP), WP + Kühlung (Kühl), Gasheizung (GasH) & Solarkollektor (Sol) und WP & Solarkollektor zur Referenz (Gasheizung ohne Solarkollektor). Rechts: Reduktion der CO₂-Emissionen.

Neben dem Primärenergiebedarf können auch die Emissionen an CO₂ der Wärmeerzeugung durch den Einsatz der Wärmepumpe mit Bodenkollektor um ca. 25% gesenkt werden. Eine weitere deutliche Reduktion sowohl des Energiebedarfs als auch der Emissionen lässt sich durch die zusätzliche Installation eines Solarkollektors erzielen.

In allen Szenarien können die Wärmepumpen mit einer Jahresarbeitszahl von ca. 3,8²⁸ betrieben werden (Abbildung 11.24). Bei Nutzung eines zusätzlichen Solarkollektors kann die Jahresarbeitszahl

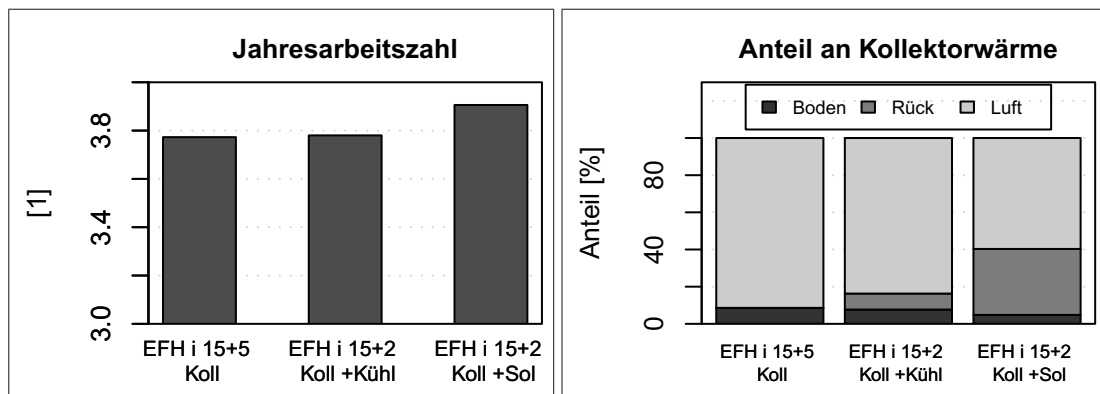


Abbildung 11.24.: Links: Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe. Rechts: Durchschnittlicher Anteil der Boden-, Solar- bzw. Kühl- und Luftwärme an der vom Kollektor nachgefragten Wärmemenge.

sogar etwas gesteigert werden. Der bis zum Ende der Betriebszeit (für die gezeigten Szenarien 15 Jahre) nicht regenerativ entzogene Anteil der Bodenwärme liegt bei dem Szenario ohne Wärmeeinkopplung bei 8,6% und sinkt bei Einbringung von Kühlwärme auf 7,7% und bei Einbringung von Solarwärme auf 4,8%. Der größte Teil der dem Boden entzogenen Wärme wird innerhalb eines Jahres aus Luftwärme nachgeführt.

²⁸EFH 3,77, + Kühlung 3,78, + Solarkollektor 3,91

Im Anschluss wurden die Auswirkungen der ansonsten gleichen Rahmenbedingungen für ein Niedrig-Energie-Haus (*EFH N*) bzw. ein Passiv-Haus (*EFH P*) betrachtet. In Abbildung 11.25 sind die resul-

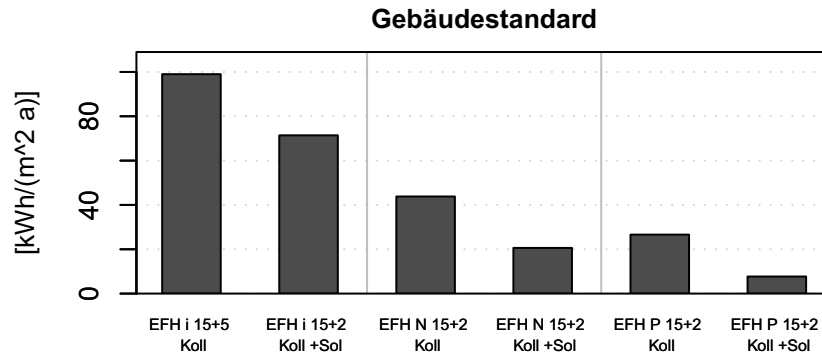


Abbildung 11.25.: Gebäudestandards der drei Haustypen mit bzw. ohne Solarkollektor. Die Gebäudestandards für Gebäude mit Kühlung unterscheiden sich nicht mit denen ohne.

tierenden Gebäudestandards für alle drei Gebäudetypen, je mit bzw. ohne Nutzung von Solarwärme gezeigt. Tabelle 11.2 zeigt eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse.

| SzNr | 101 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Gebäude | <i>EFH i</i> | <i>EFH i</i> | <i>EFH i</i> | <i>EFH N</i> | <i>EFH N</i> | <i>EFH N</i> | <i>EFH P</i> | <i>EFH P</i> | <i>EFH P</i> |
| Solarkoll. | | X | | | | X | | | X |
| Kühlung | | | X | | X | | | X | |
| Q_{Haus} | 14261 | 10276 | 14261 | 6302 | 6302 | 2963 | 3830 | 3830 | 1108 |
| $Q_{\text{Koll Entzug}}$ | 12371 | 8960 | 12375 | 5430 | 5435 | 2579 | 3261 | 3265 | 960 |
| $Q_{\text{Koll Rück}}$ | | 3179 | 1068 | | 1820 | 3888 | | 2633 | 4530 |
| $Q_{\text{Koll Ges}}$ | 12371 | 5781 | 11307 | 5430 | 3615 | -1308 | 3261 | 632 | -3570 |
| C_{Koll} | 26,2 | 26,3 | 26,2 | 12,4 | 12,4 | 12,4 | 7,5 | 7,5 | 7,5 |
| $\text{Ant}_{\text{Boden}}$ | 0,086 | 0,048 | 0,077 | 0,085 | 0,05 | -0,066 | 0,086 | 0,003 | -0,374 |
| $\text{Ant}_{\text{Rück}}$ | | 0,355 | 0,086 | | 0,335 | 1,507 | | 0,806 | 4,718 |
| Ant_{Luft} | 0,914 | 0,597 | 0,837 | 0,915 | 0,615 | -0,441 | 0,914 | 0,191 | -3,344 |
| $T_{\text{min Koll}}$ | -1 | -0,7 | -0,9 | -0,1 | 0 | 0,1 | 0,3 | 0,4 | 0,8 |
| $\Delta T_{\text{min Koll}}$ | -9,7 | -8,1 | -9,7 | -4,9 | -4,3 | -2,6 | -2,7 | -2,5 | -0,7 |
| COP | 7,5 | 7,8 | 7,6 | 7,2 | 7,3 | 7,7 | 6,7 | 6,8 | 7,5 |
| E_{elec} | 3780 | 2631 | 3773 | 1744 | 1736 | 768 | 1138 | 1129 | 297 |
| PE_{WP} | 10281 | 7156 | 10262 | 4743 | 4721 | 2088 | 3096 | 3071 | 807 |
| $\text{CO}_{2\text{WP}}$ | 2359 | 1642 | 2354 | 1088 | 1083 | 479 | 710 | 704 | 185 |
| PE_{Gas} | 15846 | 11417 | 15846 | 7003 | 7003 | 3292 | 4255 | 4255 | 1232 |
| $\text{CO}_{2\text{Gas}}$ | 3169 | 2283 | 3169 | 1401 | 1401 | 658 | 851 | 851 | 246 |

Tabelle 11.2.: Zusammenfassung der Eigenschaften der Szenarien mit horizontalem Bodenkollektor

- Q mittlere Wärmemenge pro Jahr [kWh/a],
 C spezifische Entzugskapazität des Kollektors [W/m²],
 Ant Anteil bezogen auf die durch den Kollektor aufgenommene Wärmemenge [1],
 COP Jahresarbeitszahl_{Carnot} [1],
 E_{elec} Strombedarf der Wärmepumpe bei $\eta_{WP} = 0,5$ [kWh/a],
 PE Primärenergiebedarf [kWh/a] und
 CO_2 CO₂-Emissionen [kg/a].

Sowohl die Verbesserung des thermischen Gebäudestandards als auch die Nutzung von solarer Wärme können die Restwärmenachfrage jeweils deutlich senken. Dies führt sowohl für die Deckung der Wärmenachfrage durch eine Gasheizung, als auch durch eine Wärmepumpe zu einer Reduktion des Primärenergiebedarfs (Abbildung 11.26).

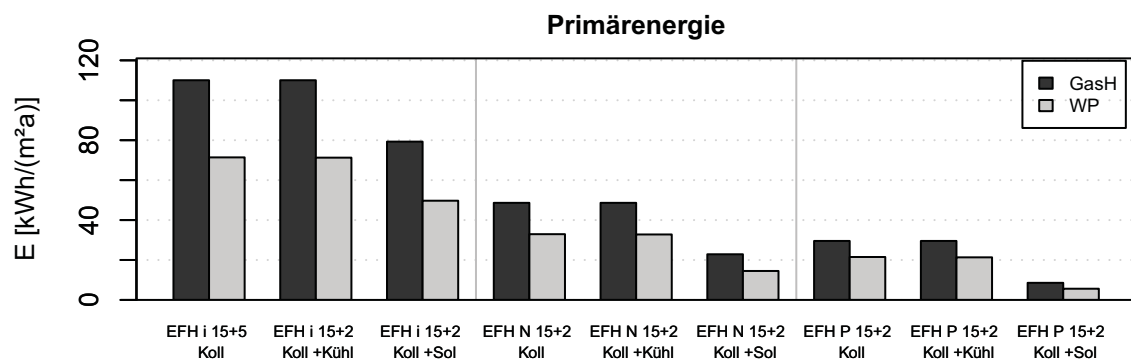


Abbildung 11.26.: Spezifische Primärenergiebedarfe für die Szenarien.

Das relative Reduktionspotential der Wärmepumpe für Primärenergie im Vergleich zu einer Versorgung mit Gas (Abbildung 11.27) ist abhängig vom Verhältnis zwischen Raumwärme- und Warm-

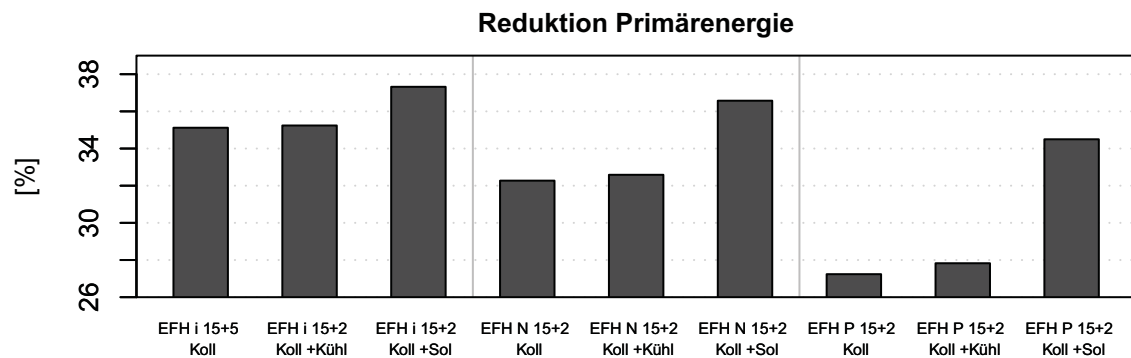


Abbildung 11.27.: Reduktionspotential der Wärmepumpe gegenüber einer Gasheizung.

wassernachfrage²⁹. Wärmepumpen können effektiver zur Bereitstellung von Wärme mit niedrigerem Temperaturniveau eingesetzt werden. Bei schlechterem thermischem Gebäudestandard erhöht sich dadurch das relative Reduktionspotential der Wärmepumpe³⁰. Selbiges gilt für die Fälle mit Nutzung

²⁹bei unterschiedlichen Temperaturniveaus

³⁰für den Fall einer Niedertemperaturbeheizung; z.B. mittels einer Fußbodenheizung

des Solarkollektors. Dieser reduziert in erster Linie die Warmwassernachfrage was zur Steigerung der Jahresarbeitszahl (Abbildung 11.28) und dadurch resultierend des relativen Reduktionspotentials der Wärmepumpe führt.

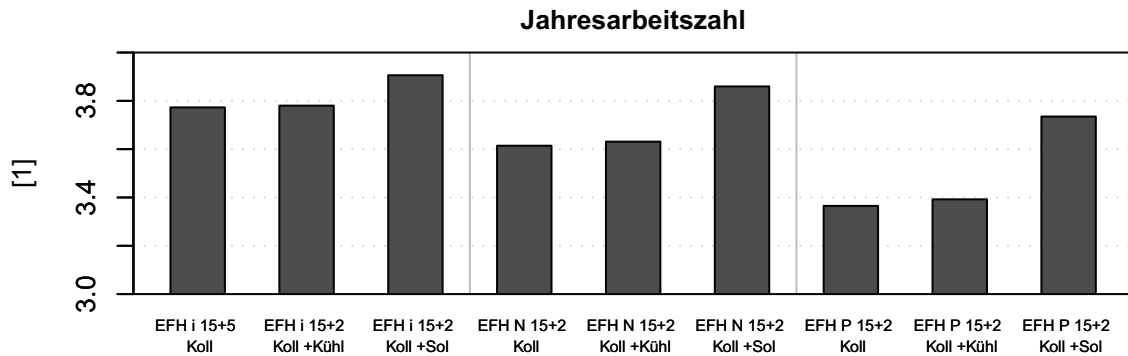


Abbildung 11.28.: Mittlere Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe.

Die Änderung der Bodentemperaturen fällt in allen simulierten Fällen mit Bodenkollektor eher gering aus. Der Anteil der nicht regenerative entzogenen Bodenwärme an der gesamten entzogenen Bodenwärme liegt in allen Fällen (bis zum Ende der 15. Heizperiode) zwischen 0 und 8,6% (Abbildung 11.29). In den Szenarien Niedrig-Energie-Haus mit Solarkollektor und Passiv-Haus mit Solarkollek-

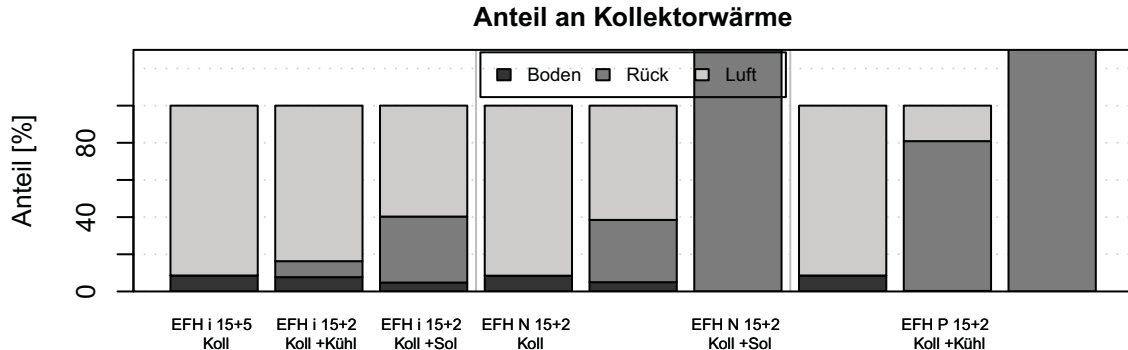


Abbildung 11.29.: Anteile des Ursprungs der Wärme am Wärmeentzug.

tor wird mehr Wärme in den Boden eingespeichert, als entzogen wird. Dies führt über die Jahre zu einer Erhöhung der Jahresmittel der Bodentemperaturen (Abbildung 11.30).

Im Szenario Passiv-Haus mit Kühlung halten sich die jährliche Ein- und Ausspeisung in etwa die Waage.

Im saisonalen Verlauf zeigen sich deutliche Auswirkungen der schwankenden Bodentemperaturen auf die Leistungszahlen der Wärmepumpe. Die Bodentemperaturen in Kollektorebene werden allerdings relativ rasch durch den Wärmeaustausch des Bodens mit der Luft an der Oberfläche wieder regeneriert. Dies führt in allen Fällen zu eher geringen Auswirkungen der Abkühlung des Bodens durch vorangegangene Betriebsjahre auf die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe. Der nicht regenerative Wärmeentzug im Boden findet in tieferen Ebenen statt.

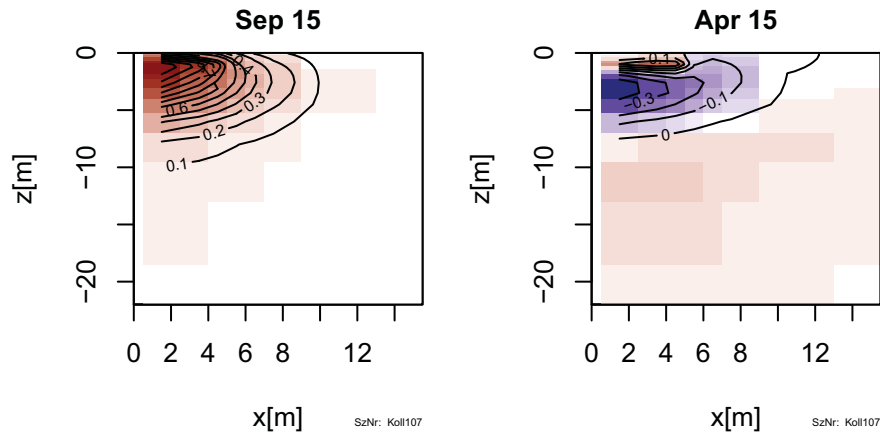


Abbildung 11.30.: Änderung der Bodentemperatur in der x-z-Ebene am Beginn der 15. Heizperiode bzw. zu Beginn der Regeneration aufgrund der externen solaren Wärmezufuhr (EFH N Koll +Sol).

11.2. vertikale Sonde

Neben dem Entzug von Wärme mittels eines horizontalen Bodenkollektors ist das System des Wärmeentzugs mittels einer vertikal angeordneten Bodensonde verbreitet. Dies soll in diesem Abschnitt simuliert werden. Es wurde für alle Szenarien eine vertikal angeordneten Bodensonde mit der Länge 99 m implementiert³¹. Es wurde keine horizontale Grundwasserströmung im Bereich der Sonde berücksichtigt. In den folgenden Szenarien wurde die Betriebszeit des Heizsystems auf 30 Jahre, die betrachtete Regenerationszeit des Modells auf 5 Jahre festgelegt. Es wurden sämtliche Gebäude- und Bodenparameter beibehalten.

Für die Modellierungen mit der Bodensonde wurde mit einer veränderten Auflösung der Bodenelemente gearbeitet um die zu erwartende Achsensymmetrie mit der Sonde als Symmetrieachse zu berücksichtigen. Allerdings wurde das kartesisch aufgebaute Modell beibehalten³². Das modellierte Bodenvolumen hat eine Ausdehnung von 160 m in z-Richtung und je 55 m in x- bzw. y-Richtung. Die Auflösung Δz variiert zwischen 0,1 m an der Bodenoberfläche und 30 m in den untersten Lagen, Δx - bzw. Δy zwischen 0,1 m in der Nähe der Symmetrieachse und 20 m. Es wird wiederum die Symmetrie der Anordnung genutzt und jeweils nur ein Quadrant simuliert. Die Ergebnisse können auf die anderen Quadranten übertragen werden.

11.2.1. EFH i:

³³ Im Folgenden werden die Auswirkungen des Entzugs von Umweltwärme aus dem Boden via einer Bodensonde für das bereits beschriebene Modellgebäude EFH i aufgezeigt. Aufgrund der Nachfra-

³¹ von 1 m bis 100 m Bodentiefe

³² Zur Simulation einer einzigen Sonde ohne symmetriebrechende Rahmenbedingungen könnte durch die Wahl eines radialsymmetrischen Systems das dreidimensionale Modell auf zwei Dimensionen reduziert werden. Dies wurde nicht realisiert.

³³ SzNr: Sonde151

gesituation und der Dimensionierung der Sonde ergibt sich eine spezifische Wärmenachfrage entlang der Sonde von $52,8 \text{ W/m}$. Nach VDI (2001) sollte die spezifische Wärmenachfrage der Sonde für Böden mit einer Wärmeleitfähigkeit λ kleiner 3 W/(m K) 60 W/m betragen. Abbildung 11.31 zeigt

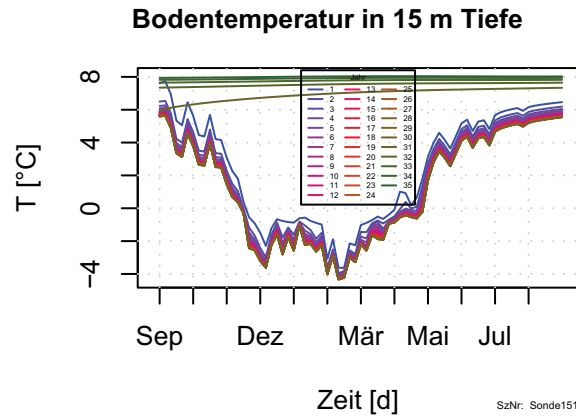


Abbildung 11.31.: Zeitlicher Verlauf der Bodentemperatur an der Sonde in einer Bodentiefe von 15 m.

den Verlauf der Bodentemperatur in einer Bodentiefe von 15 m.

Bei der Nutzung der Wärmesonde für den Entzug der Umweltwärme wird, im Vergleich zum oben betrachteten Fall des Entzugs mittels eines oberflächennahen vertikalen Bodenkollektors, zwangsläufig die genutzte Umweltwärme aus deutlich größeren Tiefen entnommen. Dementsprechend muss davon ausgegangen werden, dass ein regenerierender Wärmeaustausch über die Bodenoberfläche deutlich langsamer von statten geht. Abbildung 11.32 zeigt die Änderung der Bodentemperaturen zum unbe-

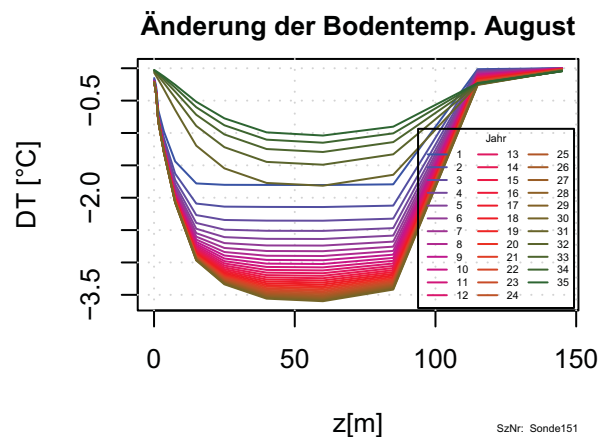


Abbildung 11.32.: Änderung der Bodentemperatur entlang der Sonde zum Ende der Modelljahre (je Ende August) Szenario (*EFH i Sond*).

lasteten Fall entlang der Sonde je zum Ende des Modelljahres (Ende August). Es kommt von Jahr zu Jahr zu einer fortschreitenden Verringerung der Bodentemperaturen in unmittelbarer Nähe zur Sonde.

Durch die nachströmende Wärme aus der Umgebung der Wärmesonde kommt es zu einer Ausprägung eines stetig anwachsenden „Kältetrichters“ (vgl. Huber (1999)³⁴) um die Sonde (Abbildung 11.33). Nach Beendigung des Wärmeentzugs nach 30 Jahren regenerieren sich die Bodentemperaturen all-

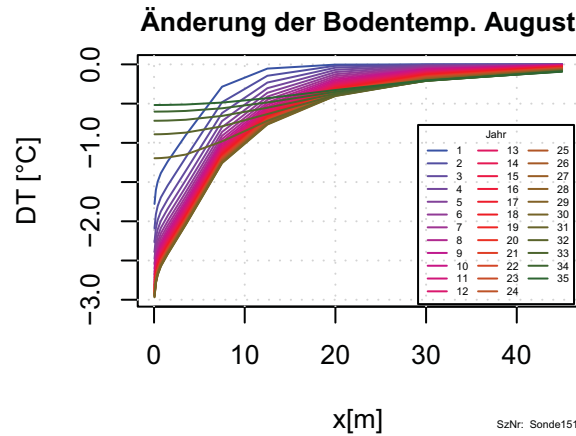


Abbildung 11.33.: Verlauf der Bodentemperatur in 15 m Tiefe in x -Richtung je zum Ende der Modelljahre (je Ende August) Szenario (EFH i Sond).

mählich. In den 5 simulierten Modelljahren nach Beendigung des Wärmepumpenbetriebs reduziert sich die Temperaturabsenkung auf ca. $0,5\text{ °C}$ im Bereich der Sonde. Jedoch kommt es auch in diesen Jahren zu einer weiteren Ausbreitung des Kältetrichters. Der Kältetrichter „zerfließt“ langsam im Boden. Im Modell hat der Kältetrichter einen Radius von ca. 50 m ³⁵. Hieraus ergibt sich ein maximaler spezifischer Flächenentzug von $4\text{ kWh}/(\text{a m}^2)$.

Der Verlauf der dem Boden entzogenen Wärmemenge ist in Abbildung 11.34 dargestellt. Es zeigt sich,

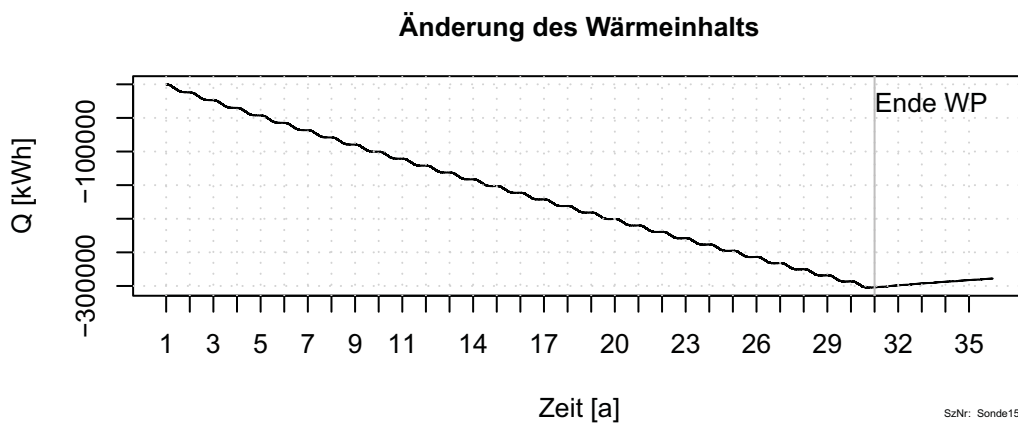


Abbildung 11.34.: Änderung des Wärmeinhalts des Bodens über den Simulationszeitraum.

dass dem Boden im Betrieb der Wärmepumpe eine große Menge an Wärme „nachhaltig“ entzogen wurde. Die Regeneration läuft deutlich langsamer ab als der Entzug.

³⁴Ist untiefe Geothermie erneuerbar? Abschnitt 1.1

³⁵Bereich in dem die Abkühlung größer als $0,1\text{ °C}$ ist.

Wie im Fall mit dem horizontalen Bodenkollektor fließt ein Teil der dem Boden entzogenen Wärme innerhalb des jeweiligen Modelljahres über die Bodenoberfläche aus der Luft nach. Die beiden Abbildungen 11.35 zeigen die Anteile am gesamten Wärmeentzug durch die Sonde die letztendlich jedes

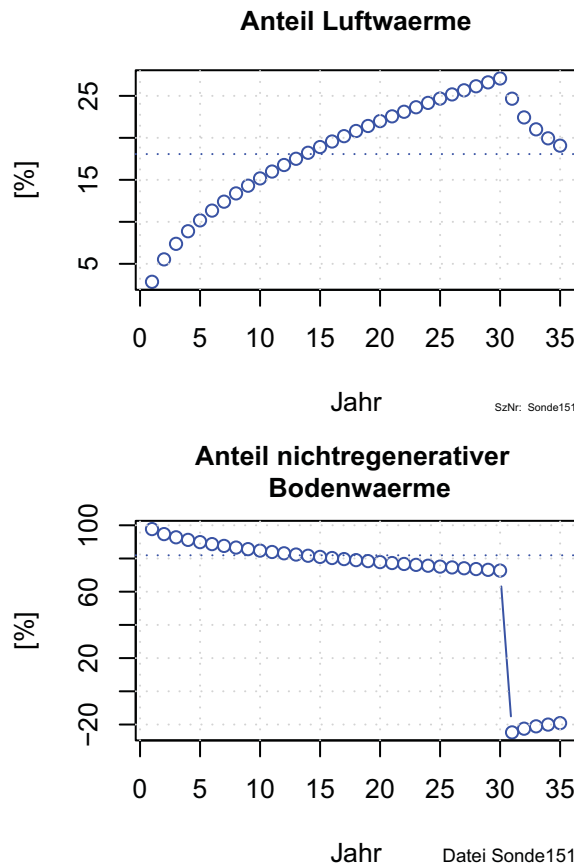


Abbildung 11.35.: Anteile der Wärme am jährlichen Wärmeentzug durch die Sonde die pro Jahr letztendlich aus der Luft (oben) bzw. aus dem Boden (unten) entzogen werden.

Jahr aus dem Boden, bzw. aus nachfließender Wärme aus der Luft gewonnen werden. Es zeigt sich, dass im ersten Jahr nahezu die gesamte Wärme rein dem Boden entnommen wird. In den folgenden Jahren steigt der Anteil der Wärme aus der Luft auf knapp 30%. Bis zum Ende der Betriebszeit werden aus der Luft insgesamt 18,1% der, dem Boden entzogenen Wärme rückgeführt³⁶. Die restlichen 82% reduzieren die Bodentemperatur. In den darauffolgenden fünf Jahren ohne Wärmeentzug fließen insgesamt in etwa 1/5 des ursprünglichen Wärmeentzugs eines Jahres über die Bodenoberfläche nach.

Wie in den Szenarien mit Wärmekollektor variiert die Jahresarbeitszahl_{Car} stark mit dem Verhältnis von Raumwärme- zu Warmwassernachfrage (siehe Abbildungen 11.36). An Tagen an denen die Wärmepumpe vornehmlich zur Bereitstellung von Warmwasser genutzt wird liegt die Leistungszahl_{Car} im Bereich von 5,2 bis 5,4. Dominiert der Raumwärmebedarf die Wärmenachfrage steigt die Leistungszahl_{Car} auf einen Bereich zwischen 6,2 und 8,2.

³⁶21,6% nach den zusätzlich simulierten 5 Regenerationsjahren

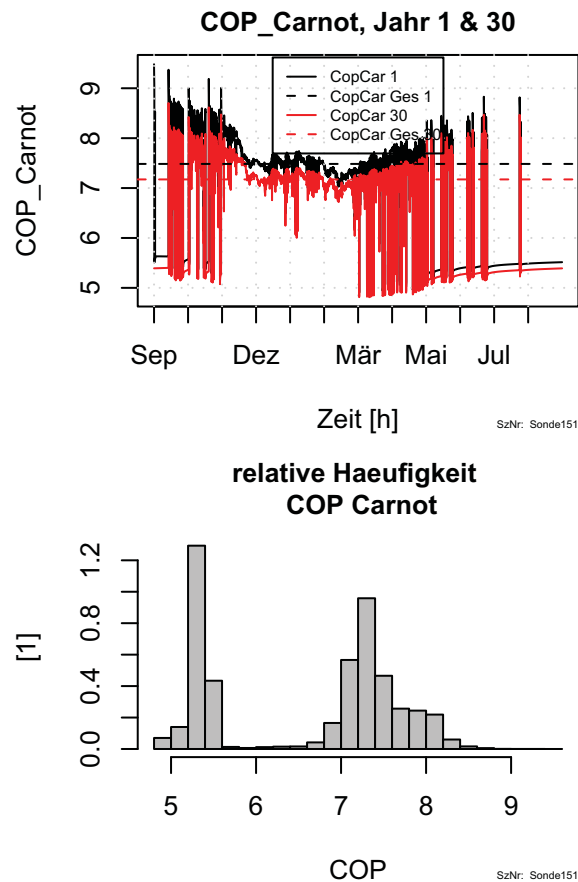


Abbildung 11.36.: Oben: Zeitlicher Verlauf der Leistungszahl der Wärmepumpe für das erste und letzte Betriebsjahr. Unten: Relative Häufigkeit der Leistungszahl_{Car} über die Betriebsdauer.

Wie in Abbildung 11.37 zu sehen hat die Ausprägung des Kältetrichters um die Bodensonde eine rück-

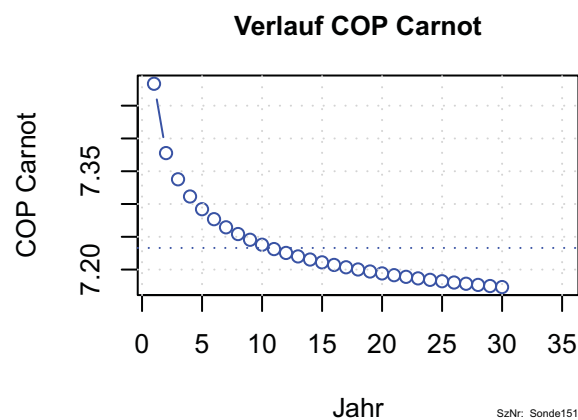


Abbildung 11.37.: Verlauf der Jahresarbeitszahl_{Car} über die Betriebsdauer.

koppelnde Wirkung auf die Jahresarbeitszahl. Diese sinkt im Verlauf des Betriebs von 7,48 im ersten Jahr auf 7,18 im letzten Jahr. Die sinkenden Jahresarbeitszahlen führen zu einem erhöhten Strombedarf der Wärmepumpe (Abbildung 11.38). Bis zum letzten Betriebsjahr erhöht sich der Strombedarf um 4%.

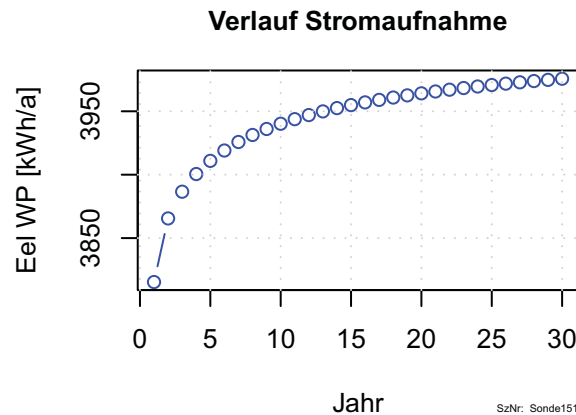


Abbildung 11.38.: Bedarf an elektrischer Energie zum Betrieb der Wärmepumpe.

Im Mittel über die 30 Betriebsjahre werden im Modell 3934 kWh/a an elektrischer Energie für den Betrieb der Wärmepumpe benötigt. Daraus ergibt sich eine Primärenergienachfrage von 10,7 MWh/a und 2461 kg an CO₂-Emissionen. Im Vergleich zu einer Gasheizung³⁷ reduziert sich der Primärenergiebedarf um 32,3%, die Emissionen um 22,4%. Die durchschnittliche Jahresarbeitszahl beträgt 7,2 (3,6).

Im Vergleich zum Modell mit dem oberflächennahen Flächenkollektor hat das simulierte System mit der Sonde einen geringfügig höheren Primärenergiebedarf³⁸.

Es zeigt sich, dass für die gewählten Boden- und Gebäudeparameter die Bodenwärme nicht als regenerativ gesehen werden kann. Ca. 80% der entzogenen Umweltwärme sind innerhalb der 35 Simulationsjahre nicht regenerativ. Weiter gibt es eine deutlich erkennbare Reduktion der Jahresarbeitszahl über die Betriebszeit³⁹.

11.2.2. Niedrig-Energie-Haus mit Solarkollektor:

Aufgrund der Tatsache, dass für den Fall des Wärmeentzugs mit Sonde die entzogene Wärme relativ lange in Sondenumgebung verweilt soll im folgenden Szenario untersucht werden, welche Auswirkungen die Einspeisung von Sonnenwärme aus einem Solarkollektor auf Boden und Wärmepumpe hat. Die Nachfrageeinheit für das Modell bildet der Gebäudetyp *EFH N*. Aufgrund der verringerten Wärmenachfrage bei gleicher Sondenlänge reduziert sich die spezifische Entzugsleistung der Sonde auf 25,4 W/m. Daneben wird der Solarkollektor mit 10 m² Kollektorfläche mit 70% Wirkungsgrad und der Wärmepuffer⁴⁰ im Modell berücksichtigt.

³⁷ $\eta = 90\%$ H_O

³⁸ 4% höher

³⁹ Reduktion um ca. 4%

⁴⁰ mit gleichbleibenden Prioritäten der Wärmenutzung

Die relativ geringe spezifische Entzugsleistung der Sonde und die Einspeisung von Solarwärme in die Sonde und somit in den Boden führt zu einer deutlichen Änderung des zeitlichen Verlaufs der Temperaturen in Sondennähe (Abbildung 11.39). Für die gewählten Parameter sinkt die Temperatur an der Sonde im Winter um ca. 4°C. Am Ende des Sommers hingegen ist die Temperatur um ca. 4°C gegenüber dem unbelasteten Fall erhöht.

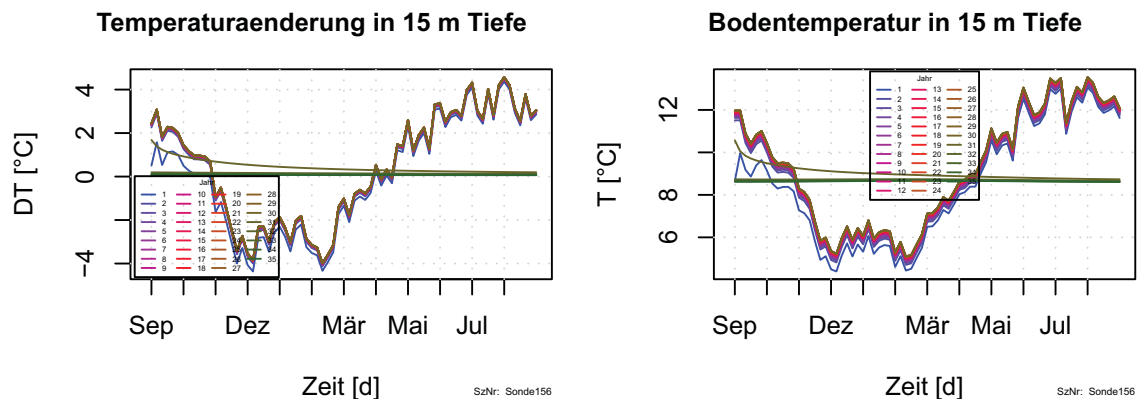


Abbildung 11.39.: Zeitlicher Verlauf der Änderung der Bodentemperatur an der Sonde in einer Bodentiefe von 15 m aufgrund des Wärmeentzugs und der Wärmeeinkopplung.

Aus dem Vergleich zum Temperaturverlauf des vorangegangenen Szenario (Abbildung 11.31) zeigt sich, dass es durch die Rückspeisung von Wärme aus dem Sonnenkollektor nicht zu einer fortschreitenden Abkühlung im Sondenbereich kommt.

Die Abbildungen 11.40 zeigen die Temperaturänderung im vertikalen Schnitt durch die Sonde je für das Ende des Monats September, November, März und August für das letzte Jahr des Betriebs der Wärmepumpe. Im saisonalen Wechsel ist in unmittelbarer Umgebung um die Sonde der Bodentemperatur im Winter und Frühjahr abgesenkt, während sie im Sommer und Herbst erhöht ist. In Summe wird jedes Jahr im Sommer mehr Wärme eingespeichert als im Winter entzogen wird. Im Modell wird jährlich in etwa die 1,5 fache Menge der entzogenen Bodenwärme wieder durch Wärme aus dem Solarkollektor in den Boden eingespeichert. Dementsprechend kommt es in diesem Szenario zur Ausbreitung eines Wärmetrichters um die Sonde.

Die Auswirkungen der veränderten Bodentemperaturen auf die Leistungszahl_{Car} sind in den Abbildungen 11.41 wiedergegeben. Durch den Einsatz des Solarkollektors und des Wärmepuffers kann im Modell der Bedarf an Wärme aus der Wärmepumpe zur Warmwasserbereitstellung deutlich reduziert werden. Über weite Strecken des Sommers kann vollständig auf den Betrieb der Wärmepumpe verzichtet werden. Die Wärmepumpe wird nahezu ausschließlich mit Leistungszahlen_{Car} zwischen 8 und 10 betrieben. Dabei kommt es im Verlauf über die Jahre zu geringfügig steigenden Leistungszahlen (Abbildung 11.42). Dies ist durch die oben beschriebene Ausbreitung des Wärmetrichters begründet. Der Anstieg der Bodentemperaturen und somit der Jahresarbeitszahl führt, wie in Abbildung 11.43 gezeigt, zu einer Reduktion des Bedarfs an elektrischer Energie für die Wärmepumpe

Zu Deckung der Rest-Wärmenachfrage⁴¹ durch die Wärmepumpe sind im Mittel 682 kWh/a an

⁴¹Wärmenachfrage nach Abzug der vom Solarkollektor erbrachten Wärme

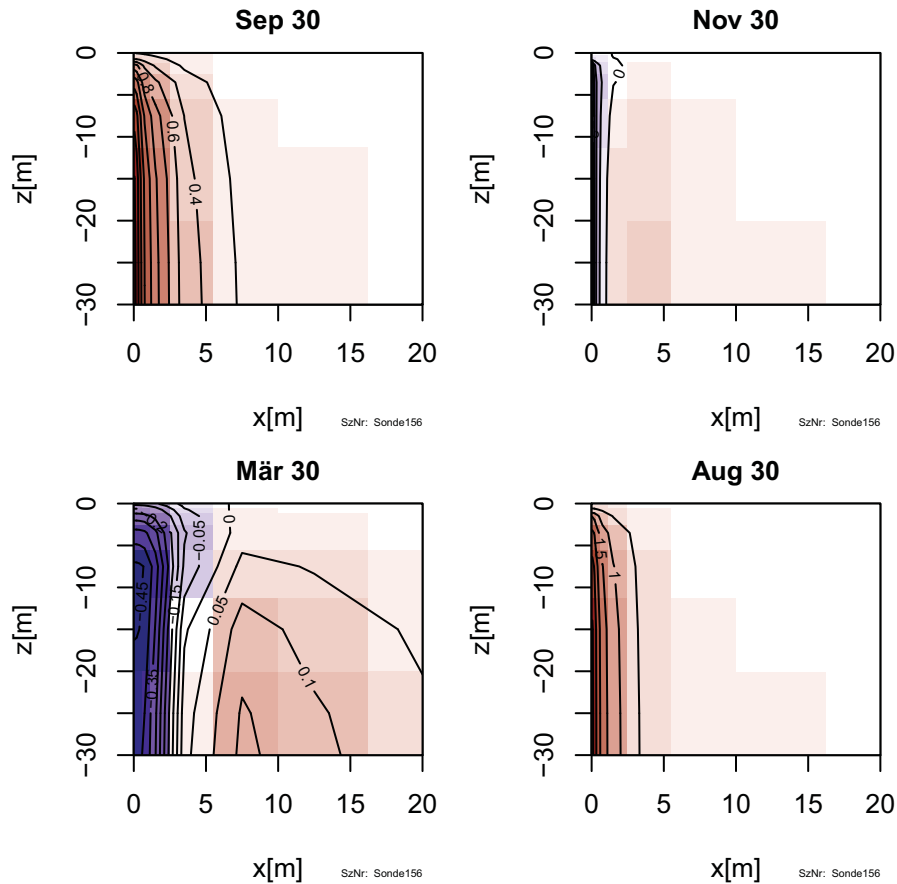


Abbildung 11.40.: Änderung der Bodentemperatur in der x-z-Ebene in der 30. Heizperiode aufgrund des Wärmeentzugs und der externen solaren Wärmezufuhr (*EFH N Sonde + Sol*).

Strom bzw. 1856 kWh/a an Primärenergie⁴² notwendig. Gegenüber einer Deckung der Nachfrage des Gebäudes *EFH N* mit Solarkollektor und Gasheizung können dadurch 43,6% des Primärenergiebedarfs vermieden werden. Im Schnitt lässt sich in diesem Szenario durch die Rückführung von Solarwärme in den Boden eine deutliche Steigerung der Jahresarbeitszahl auf 8,7 (4,35) erreichen.

⁴² 12,9 kWh/(m²a)

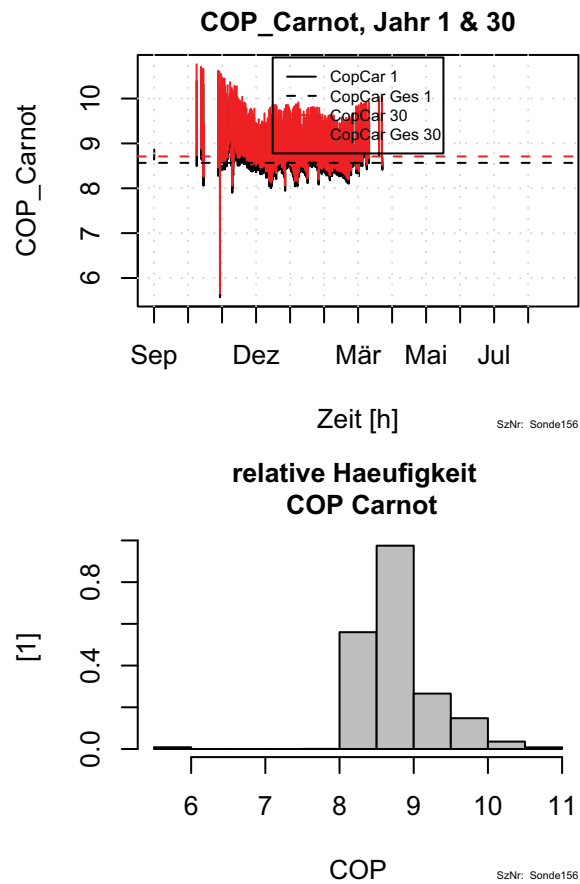


Abbildung 11.41.: Oben: Leistungszahl der Wärmepumpe für das erste und letzte Betriebsjahr. Unten: Relative Häufigkeit der Leistungszahl_{Car} über die Betriebsdauer.

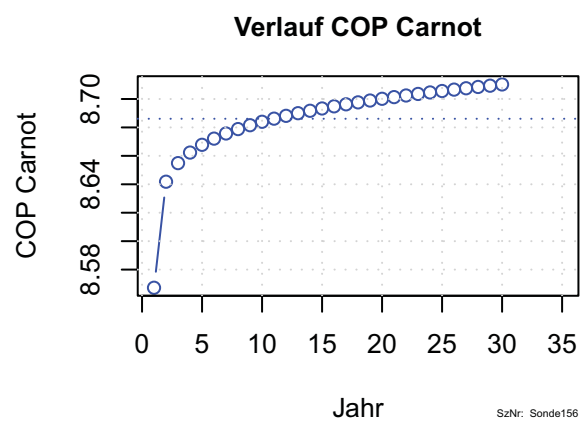


Abbildung 11.42.: Verlauf der Jahresarbeitszahl_{Car} über die Betriebsdauer.

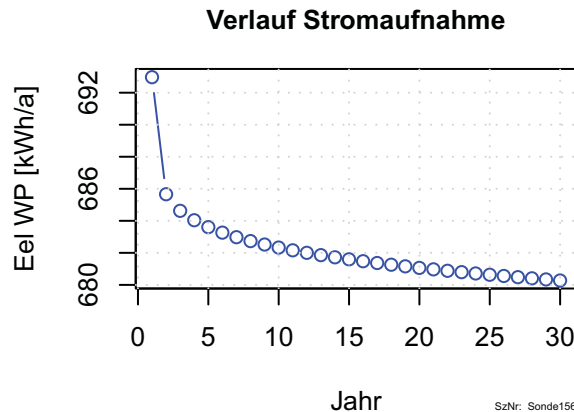


Abbildung 11.43.: Bedarf an elektrischer Energie für den Betrieb der Wärmepumpe.

11.2.3. Passiv-Haus *EFH P* mit Kühlung

Für das Passiv-Haus mit Kühlung werden im Simulationsmodell im Sommer zur Kühlung 2634 kWh/a (ca. 93% des gesamten Wärmeentzugs) wieder aktiv in den Boden rückgeführt. Dadurch kann die Jahresarbeitszahl nahezu konstant bei 7,2 (3,6) gehalten werden. Dennoch ist der Primärenergiebedarf mit 2890 kWh/a⁴³ deutlich höher als bei dem Niedrig-Energie-Haus mit Wärmepumpe und Solarkollektor.

11.2.4. Zusammenfassung Sonde

Wie bei den Szenarien mit Bodenkollektor wurden auch für den Fall Erdsonde alle drei Gebäudestandards je in den drei Varianten ohne Wärmerückspeisung, mit Solarkollektor und mit Rückführung der Kühlwärme aus dem Gebäude simuliert. In Tabelle 11.3 sind die wichtigsten Ergebnisse der Modellszenarien zusammengefasst.

Bei der Nutzung einer Erdsonde als Quelle für Umweltwärme geht die natürliche Regeneration des Wärmeentzugs über die Bodenoberfläche, aufgrund der größeren Distanz zur Oberfläche deutlich langsamer von statten als bei der Nutzung eines Flächenkollektors. Die Simulation zeigt, dass der Anteil an nicht regenerativ entzogener Bodenwärme bis zum Ende des Wärmepumpenbetriebs dementsprechend deutlich höher ist. Der Entzug von Wärme mittels Erdsonde führt zur Ausbildung eines Temperaturtrichters (vgl. Huber (1999)⁴⁴). Ohne aktive Rückspeisung von Wärme liegt der Anteil an Wärme der aus dem Boden entzogen und nicht über die Bodenoberfläche rückgeführt wurde bis zum Ende der Betriebszeit bei ca. 80%. Die restliche entzogene Wärme fließt über die Oberfläche nach (Abbildung 11.44).

Die Jahresarbeitszahlen für die modellierten Szenarien sind vergleichbar mit den Jahresarbeitszahlen unter Benutzung eines Flächenkollektors (Abbildung 11.45). In Kombination mit einem Solarkollektor und aktiver Rückführung von überschüssiger Wärme aus dem Solarkollektor in den Boden können die Jahresarbeitszahlen deutlich gesteigert werden.

⁴³20,1 kWh/(m²a)

⁴⁴Abschnitt 3.1 „Ausbreitung des Temperaturtrichters“

| SzNr | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Gebäude | <i>EFH i</i> | <i>EFH i</i> | <i>EFH i</i> | <i>EFH N</i> | <i>EFH N</i> | <i>EFH N</i> | <i>EFH P</i> | <i>EFH P</i> | <i>EFH P</i> |
| Solarkoll. | | | X | | | X | | | X |
| Kühlung | | X | | | X | | | X | |
| Q_{Haus} | 14261 | 12223 | 8807 | 5402 | 5402 | 2540 | 3283 | 3283 | 950 |
| $Q_{\text{Sond Entzug}}$ | 12289 | 10544 | 7683 | 4683 | 4692 | 2247 | 2817 | 2827 | 841 |
| $Q_{\text{Sond Rück}}$ | | 915 | 2726 | | 1560 | 3334 | | 2258 | 3884 |
| $Q_{\text{Sond Ges}}$ | 12289 | 9629 | 4956 | 4683 | 3133 | -1086 | 2817 | 570 | -3043 |
| C_{Sond} | 52,8 | 52,8 | 53,1 | 25,3 | 25,3 | 25,4 | 15,4 | 15,4 | 15,5 |
| Ant_{Boden} | 0,819 | 0,748 | 0,527 | 0,82 | 0,546 | -0,401 | 0,82 | 0,163 | -2,978 |
| $Ant_{\text{Rück}}$ | | 0,087 | 0,355 | | 0,332 | 1,483 | | 0,799 | 4,618 |
| Ant_{Luft} | 0,181 | 0,165 | 0,118 | 0,18 | 0,121 | -0,083 | 0,18 | 0,039 | -0,64 |
| $T_{\text{min Sond}}$ | -4,3 | -4,2 | -2,6 | 2,6 | 3 | 4,4 | 5,2 | 5,4 | 6,5 |
| COP | 7,2 | 7,3 | 7,8 | 7,5 | 7,6 | 8,7 | 7,1 | 7,2 | 8,7 |
| E_{elec} | 3943 | 3918 | 2624 | 1678 | 1656 | 682 | 1086 | 1063 | 254 |
| PE_{WP} | 10725 | 10658 | 7138 | 4565 | 4503 | 1856 | 2955 | 2890 | 692 |
| CO_2_{WP} | 2461 | 2445 | 1638 | 1047 | 1033 | 426 | 678 | 663 | 159 |
| PE_{Gas} | 15845 | 15845 | 11417 | 7002 | 7002 | 3292 | 4255 | 4255 | 1232 |
| CO_2_{Gas} | 3169 | 3169 | 2283 | 1400 | 1400 | 658 | 851 | 851 | 246 |

Tabelle 11.3.: Zusammenfassung Szenarien mit vertikaler Bodensonde

- Q mittlere Wärmemenge pro Jahr [kWh/a],
 C spezifische Entzugskapazität des Kollektors [W/m],
 Ant Anteil bezogen auf die durch den Kollektor aufgenommene Wärmemenge [1],
COP Jahresarbeitszahl_{Carnot} [1],
 E_{elec} Strombedarf der Wärmepumpe bei $\eta_{\text{WP}} = 0,5$ [kWh/a],
 PE Primärenergiebedarf [kWh/a] und
 CO_2 CO_2 -Emissionen [kg/a].

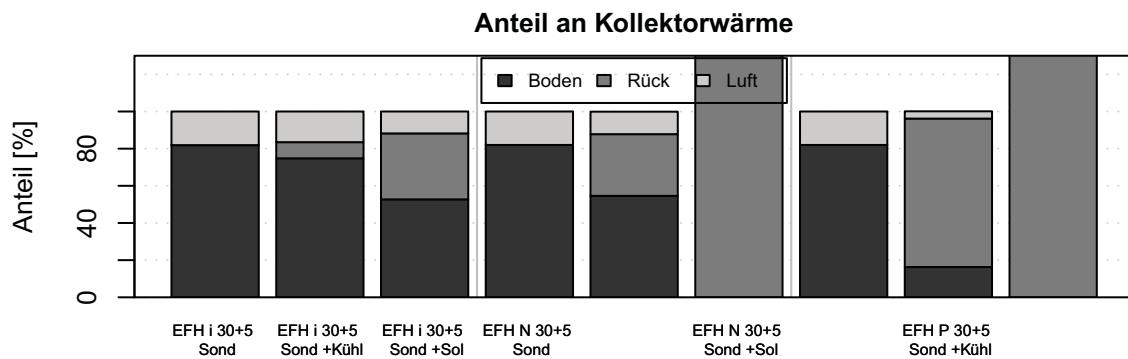


Abbildung 11.44.: Anteile der Wärmequellen bis zum Ende der Betriebsdauer nach 30 Jahren.

Im Vergleich kann im Modell durch die Wärmepumpe gegenüber einer Gasheizung zwischen 30 und 35% des Primärenergiebedarfs eingespart werden. In Kombination mit einem Solarkollektor und aktiver Wärmerückspeisung in den Boden kann in den Modellen eine Reduktion des Primärenergiebedarfs im Vergleich zu einer Beheizung mittels einer Gasheizung und einem Solarkollektor um bis zu 41% erreicht werden (Abbildungen 11.46 & 11.47).

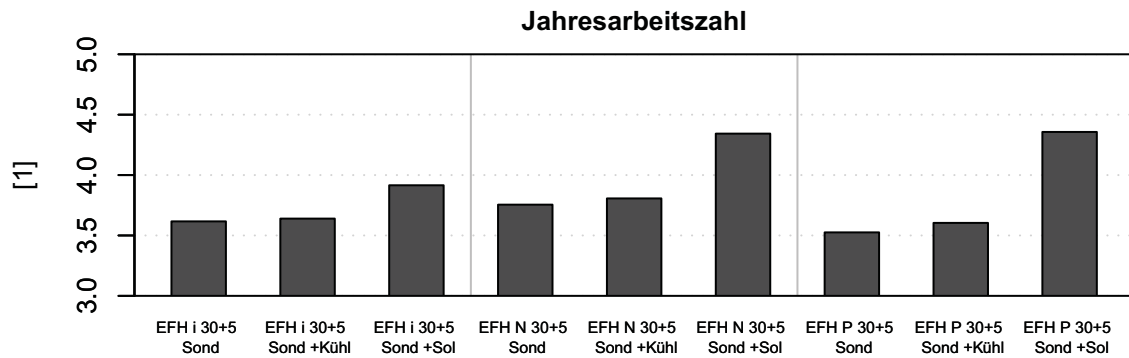
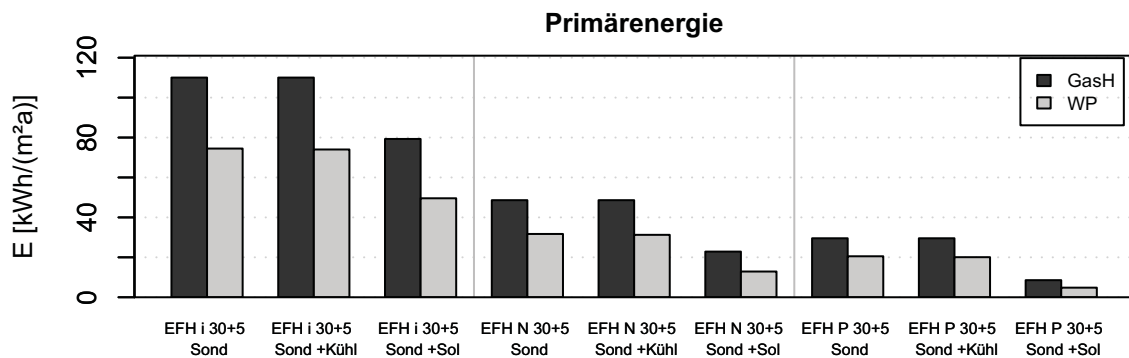
Abbildung 11.45.: Mittlere Jahresarbeitszahl_{real}.

Abbildung 11.46.: Primärenergiebedarf je für Versorgung mit Gasheizung bzw. Wärmepumpe und Sonde.

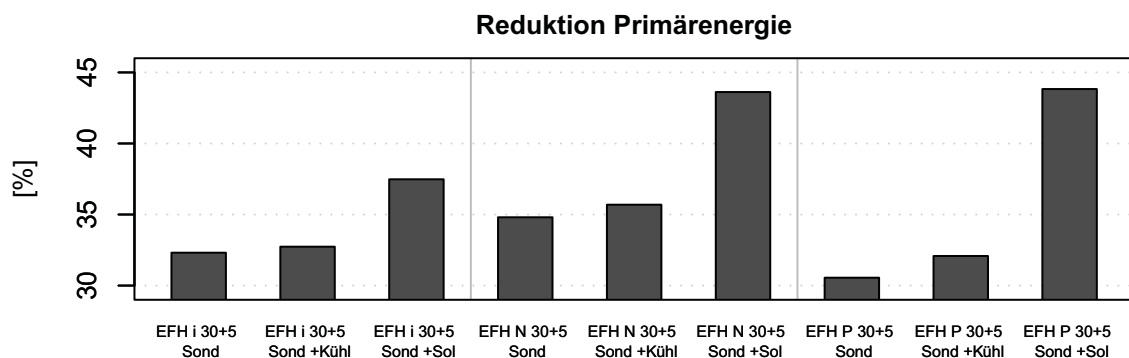


Abbildung 11.47.: Reduktion des Primärenergiebedarf für die Versorgung mit Wärmepumpe und Sonde gegenüber der Versorgung mit Gasheizung.

11.3. Kollektor unter Keller

Im Szenario (*EFH N SOND +Sol*) zeigte sich die positive Wirkung auf Jahresarbeitszahl und Primärenergiebedarf für den Fall, dass sommerliche Wärme aus einem Solarkollektor genutzt und zum Teil

längerfristig in der Umgebung der Sonde bzw. des Kollektors gespeichert werden kann. Dieser Effekt ist für die Sonde deutlich ausgeprägter als für den Bodenkollektor in Oberflächennähe. Bei letzterem „entweicht“ die eingespeicherte Wärme relativ rasch über die Oberfläche. Um den positiven Effekt der Wärmespeicherung im Boden ohne die zum Teil aufwendige Installation einer Bodensonde nutzen zu können, ist es denkbar ein Flächenkollektor direkt unterhalb eines zu versorgenden Gebäudes zu installieren. Im Bereich des Gebäudeneubaus könnte diese Variante gegenüber einer Sonde Vorteile aufweisen. Der Verlauf der entzogenen bzw. eingespeicherten Wärme unterhalb der Bodenplatte eines Gebäudes wurde im folgenden Szenario⁴⁵ untersucht. Abbildung 11.48 zeigt die Temperaturen

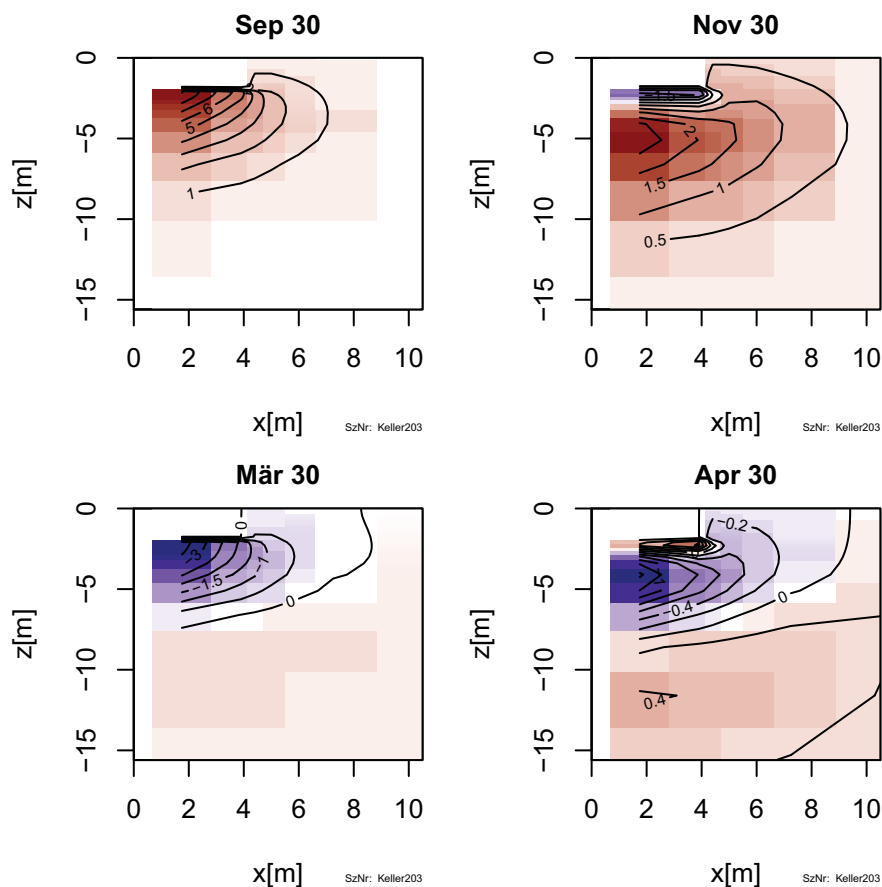
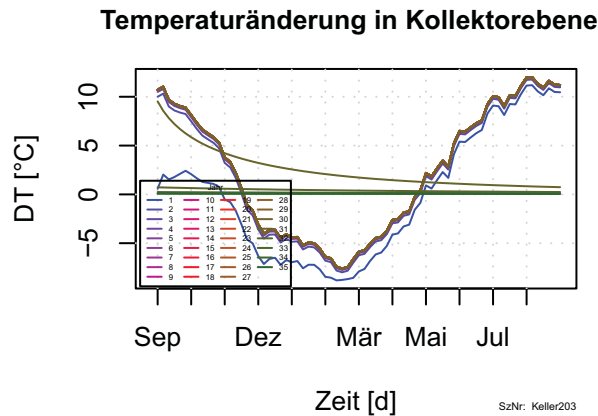
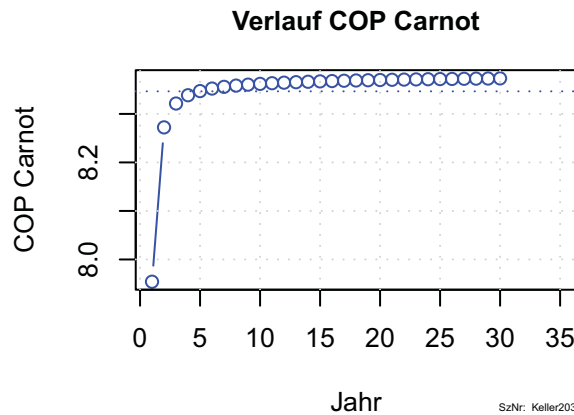


Abbildung 11.48.: Änderung der Bodentemperatur in der x-z-Ebene in der 30. Heizperiode aufgrund des Wärmeentzugs und der externen solaren Wärmezufuhr (*EFH N KoKe + Sol*).

im Schnitt durch den Boden. Es zeigt sich, dass die eingespeicherte Wärme am sofortigen Abfließen an die Oberfläche durch die Installation des Kollektors unterhalb des Kellers gehindert werden kann. Die aktive Wärmerückspeisung führt aufgrund des gehemmten Wärmeflusses zwischen Kollektor und Bodenoberfläche zu einer Erwärmung in der unmittelbaren Umgebung um den Kollektor (Abbildung 11.49).

Dadurch kann die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe in ähnlicher Größe wie im Modellszenario mit Erdsonde gesteigert werden, wie sich in Abbildung 11.50 zeigt.

⁴⁵SzNr: 203

Abbildung 11.49.: Verlauf der Änderung der Temperatur in Kollektorebene (*EFH N KoKe + Sol*).Abbildung 11.50.: Verlauf der Jahresarbeitszahl_{Car} (*EFH N KoKe + Sol*).

Die für den Betrieb der Wärmepumpe notwendige elektrische Energie kann in dem Modellszenario auf 706 kWh/a reduziert werden. Der durchschnittliche Primärenergiebedarf beträgt somit 1920 kWh/a⁴⁶ bzw. 6913 MJ/a.

Zu beachten ist, dass die Kollektorebene an 435 Stunden im Modellzeitraum gefroren ist (entspricht 6 Tage pro Jahr). Dies könnte unter Anbetracht der Ausdehnung beim Gefrieren des Bodens eventuell zu statischen Problemen am Gebäude führen. Hierauf wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Besonders für das Niedrig-Energie-Haus erweist sich die Kombination Wärmepumpe und Solarkollektor als vielversprechend. Im Folgenden werden für das Niedrig-Energie-Haus die Ausstattungsvariante mit Solarkollektor und Bodenkollektor unterhalb des Kellers mit den Varianten ohne Solarkollektor, mit Solarkollektor und oberflächennahem Bodenkollektor bzw. mit Solarkollektor und Erdwärmesonde verglichen. Die Abbildungen 11.51 und 11.52 zeigen die wichtigsten Vergleichsparameter.

⁴⁶ 13,4 kWh/(m²a)

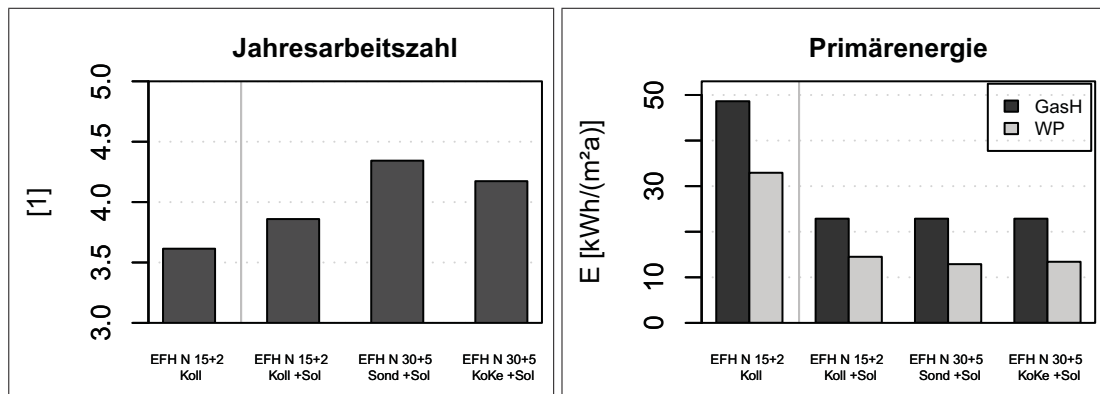


Abbildung 11.51.: Links: Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe für das Niedrig-Energie-Haus ohne Solarkollektor im Vergleich mit den Niedrig-Energie-Häusern mit Solarkollektor und oberflächennahem Bodenkollektor bzw. Erdwärmesonde bzw. Bodenkollektor unterhalb des Kellers. Rechts: Primärenergiebedarf der Szenarien bei Deckung mittels Wärmepumpe bzw. Gasheizung.

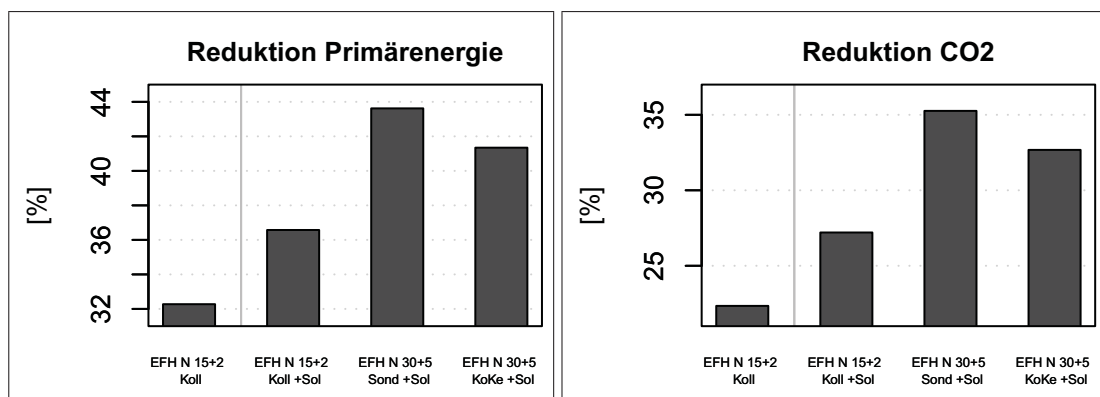


Abbildung 11.52.: Links: Reduktion des Primärenergiebedarfs der Szenarien mit Wärmepumpe gegen den Primärenergiebedarf bei Deckung der Rest-Wärmenachfrage mittels Gasheizung für Niedrig-Energie-Häuser. Rechts: Reduktion der CO₂-Emissionen.

Durch die Nutzung von Solarwärme können sowohl der Primärenergiebedarf als auch die CO₂ - Emissionen bedeutend reduziert werden. Dabei ist die Reduktion um so höher, je besser es gelingt, die sommerliche Wärmeeinspeisung bis zu den Monaten hoher Wärmenachfrage zu konservieren. Dies funktioniert im Modell mit der Erdsonde am besten, mit dem oberflächennahen Bodenkollektor am wenigsten. Die Variante mit Flächenkollektor unterhalb des Gebäudes erreicht annähernd die positiven Eigenschaften der Variante mit Erdsonde.

Ein Flächenkollektor unterhalb der Bodenplatte eines Gebäude könnte zwei entscheidende Vorteile gegenüber einer Sonde aufweisen. Bei der Installation einer Erdsonde ist damit zu rechnen, dass grundwasserführende Schichten durchstoßen werden. Dies hat⁴⁷ einen möglichen Abtransport von Kälte bzw. Wärme zur Folge. Dadurch wird unter Umständen ein großer Teil der eingespeicherten Wärme ungenutzt abtransportiert. Mit einem Flächenkollektor unterhalb der Bodenplatte kann dieser

⁴⁷neben möglichen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Wasserqualität der wasserführenden Schichten

Wärmeverlust vermieden werden⁴⁸.

Im Weiteren könnte im Neubaubereich die Installation eines Flächenkollektors unterhalb der Bodenplatte mit relativ geringem Aufwand realisierbar sein. Dadurch könnte das System durch die hohe zu erzielende Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und „überschaubaren“ Installationsmehrkosten gegenüber der Installation eines herkömmlich positionierten Flächenkollektors wirtschaftlich eine attraktive Variante der Wärmebedarfsdeckung darstellen.

⁴⁸wenn Grundwasser erst unterhalb des Kollektors anzutreffen ist.

Teil IV.

Diskussion

Das Energiesystem auf unserer Erde ist komplexer als es auf den ersten Blick erscheint. Dabei ist die Komplexität in erster Linie nicht der genutzten Umwandlungs- und Transportmechanismen geschuldet, vielmehr resultiert sie aus dem Zusammenspiel der unzähligen technischen, ökonomischen, ökologischen und politischen Einflussfaktoren.

Beispielsweise ist die Entwicklung der Energienachfrage einer unzähligen Anzahl an Einflüssen unterworfen. Hier spielen der Klimawandel, technische Weiter- und Neuentwicklungen⁴⁹ und deren Durchdringung in die Märkte und eine Änderung der Ansprüche der Menschen bei einer Änderung derer wirtschaftlicher Situation eine wichtige Rolle. Darüber hinaus haben Effekte wie beispielsweise der Rebound-Effekt einen, nur sehr schwer mit Zahlen und Funktionen beschreibbaren Einfluss auf die Nachfrage. Daneben haben sich auf dem Energiemarkt eher oligopolistische Strukturen ergeben die im Allgemeinen nicht durch die Gesetzmäßigkeiten transparenter Märkte beschrieben werden können. Diese Rahmenbedingungen machen eine Vorhersagbarkeit der Entwicklungen im Energiesystem nur bedingt möglich.

Der Wärmeatlas

Nichts desto trotz wurde in dieser Arbeit versucht die Entwicklung eines Teils des Energiesystems bis in das Jahr 2050 zu projizieren. Im Teil I konnte dabei gezeigt werden, dass es möglich ist, den Raumwärmebedarf einer Stadt aufgrund der Gebäudetopologie und -typologie und der physikalischen Wärmetransporteffekte in ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Dies stellt einen im Vergleich zu bisherigen Arbeiten tiefergehenden Ansatz zur Bestimmung urbaner Wärmebedarfe dar. Mit der Methode können zum Einen Wärmebedarfe für Gebäude bestimmt werden für die auf anderem Wege keine Quantifizierung möglich wäre, zum Anderen kann durch die Berechnungsweise der Wärmenachfrage anhand mathematisch beschreibbarer physikalischer Effekte die Entwicklung des Raumwärmebedarfs einer Stadt aufgrund weniger Rahmenbedingungen eingeschätzt werden.

Für Augsburg wurde die Entwicklung der städtischen Wärmenachfrage für vier unterschiedliche Sanierungsraten berechnet. In dem Szenario ohne eine energetische Sanierung von Gebäuden ist allein durch den zu erwartenden Klimawandel mit einer Abnahme des Wärmebedarfs für die Bereitstellung von Raumwärme im Gebäudebestand bis 2050 um 23% zu rechnen. Bei einer, zu der in den letzten Jahren zu beobachtenden, gleichbleibenden Gebäudesanierungsrate von 1% pro Jahr beträgt die Reduktion der Wärmenachfrage im gesamten Stadtgebiet bis 2050 56% gegenüber dem Jahr 2010 (Abbildung 5.1 bzw. Tabelle 5.2).

Durch die Wärmebedarfsrechnung aufgrund der georeferenzierten Gebäude ist es möglich Wärmebedarfskarten zu generieren (Abbildung 3.9). Diese eignen sich hervorragend um Regionen unterschiedlicher Nachfragedichte zu identifizieren. Somit ist es möglich innerhalb der Stadt Regionen in Abhängigkeit der Wärmenachfragedichte und deren Entwicklung mit unterschiedliche Versorgungskonzepten und -technologien zu bedienen.

Optimierung mit *newURBS*

Die Ergebnisse des Wärmeatlas für Augsburg bilden die Grundlage für die im Teil II bearbeiteten Optimierungsszenarien. In diesen konnte aufgezeigt werden, welche Auswirkungen unter anderem

⁴⁹beispielsweise Elektromobilität

der Rückgang der Raumwärmenachfrage auf eine „optimale“ Energieversorgung hat. Als weitere entscheidende Rahmenbedingungen für eine Optimierung des Augsburger Stadtenergiesystems wurden die spezifischen Emissionen an Kohlendioxid des in die Stadt importierten Stroms und die stadintern gewählten, bzw. extern vorgegebenen CO₂ Reduktionsziele Augsburgs identifiziert.

Für die Optimierung der Energiesysteme wurde auf das Tool *newURBS* zurückgegriffen. Allerdings wurde dieses deutlich überarbeitet und um einige Funktionen erweitert. Die Ergebnisse der Optimierung zeigen, dass sich für Kommunen⁵⁰, sollten sie Ambitionen zur Reduktion der Emissionen haben, zwei sich grundsätzlich unterscheidende Pfade der Handlungsalternativen ergeben. Diese sind in den Modellen vorwiegend von den spezifischen CO₂-Emissionen des in die Stadt importierten Stroms abhängig.

Szenario CO₂-armer Stromimport

Zum Einen könnten Kommunen auf eine Dekarbonisierung des Importstroms hoffen und sich verstärkt dem Wärmemarkt widmen. Diese Hoffnung ist nicht unbegründet. Zur Dekarbonisierung des Importstroms für Europäische Städte könnten beispielsweise Projekte wie das desertec-Projekt beitragen. Ebenso ist eine Rückkehr in die Kernspaltungstechnologie⁵¹ und/oder langfristig ein Einstieg in ein auf Kernfusion basierenden Stromsystem denkbar. Daneben gibt es Anstrengungen mittels CCS⁵² Technologien Kohlekraft klimatisch zukunftsfähig zu machen. Diese großtechnischen Lösungen sind für einzelne Kommunen bzw. Stadtwerke aufgrund ihrer Größe eher schwer zu stemmen und würden dementsprechend wahrscheinlich von größeren Energiekonzernen oder Wirtschaftskonsortien realisiert.

Gelingt diese „kontinentale“ Dekarbonisierung der Stromerzeugung, können und sollten regionale Anstrengungen eher auf den Wärmemarkt begrenzt werden (Abbildung 5.1). Über Anreize zur energetischen Sanierung von Gebäuden könnte der Raumwärmebedarf deutlich verringert werden⁵³. Im Weiteren kann durch den Einsatz erneuerbarer Energiequellen die verbleibende Wärmenachfrage mit verhältnismäßig geringen Emissionen an CO₂ gedeckt werden. Sämtliche dem Modell zur Verfügung stehende Biomasse wird in diesem Fall für die dezentrale Wärmeherzeugung genutzt. Neben Biomasse trägt auch die Solarthermie erheblich zur Deckung der Wärmenachfragen bei (Abbildung 8.27). Die zentrale Kraftwärmekopplung mit einem Fernwärmenetz zeigt sich in den gerechneten Szenarien weder ökologisch noch ökonomisch vorteilhaft. Dementsprechend verringern sich durch den Wegfall dieses stark ortsgebundenen Geschäftsfelds der zentralen Wärmeherzeugung und -verteilung Standortvorteile von Stadtwerken⁵⁴.

⁵⁰ Stadtregierung, Stadtverwaltung, Stadtwerke, ...

⁵¹ mit all deren ungelösten Problemen

⁵² Abtrennung und Speicherung von CO₂ in fossilen Kraftwerken

⁵³ daraus resultierende höhere Kühlbedarfe im Sommer wurden in den Modellen nicht berücksichtigt.

⁵⁴ Der Prozesswärmebedarf der Industrie wurde in den Betrachtungen dieser Arbeit nicht berücksichtigt und kann hier deutlichen Einfluss haben. Dieser muss jedoch von Fall zu Fall betrachtet werden und kann nicht durch einen statistischen Ansatz, wie hier verfolgt, beurteilt werden.

Szenario CO₂-intensiver Stromimport

Einiges in der derzeitigen Energiewirtschaft spricht gegen eine schnelle Dekarbonisierung der Stromerzeugung. Beispielsweise werden nach A. Peters (2010) in Deutschland derzeit⁵⁵ 20 Kohlekraftwerke mit ca. 22 GW an elektrischer Leistung geplant oder bereits gebaut. Für diesen Fall muss, sollen die Emissionen deutlich reduziert werden auf regionaler Ebene sowohl der Wärme- als auch der Stromsektor umgestaltet werden. Im Wärmemarkt unterscheiden sich die Handlungsalternativen nur bedingt von den vorher beschriebenen. Im Stromsektor müsste eine nachhaltige Stromproduktion zu wesentlichen Teilen auf regionale erneuerbare Energien basieren. Hierbei spielen Wind- und Photovoltaikstrom eine entscheidende Rolle. Dabei ist das Verhältnis zwischen Wind und Photovoltaikkapazität neben anderen Parametern zu einem großen Maße von der Entwicklung der Investitionskosten dieser Anlagen abhängig. Energie aus Biomasse bildet einen weiteren Pfeiler einer regionalen, CO₂ armen Energieversorgung. Allerdings ist das Potential aufgrund der Begrenztheit der Flächen, der Flächenkonkurrenz zu anderen Nutzungen, den hohen Transportkosten und in entscheidendem Maße vom, im Vergleich zu technischen Möglichkeiten, geringen Umwandlungswirkungsgrad der Photosynthese von ca. 1 bis 3% beschränkt.

Für die Versorgung des Stadtgebiets mit Strom muss dessen Beschaffung bzw. Handel aufgrund des hohen Anteils an fluktuierenden Stromquellen in einem solchen System viel kurzfristiger geregelt sein. Im Modell spielt für die Region mit steigendem Reduktionsziel der Import von Grundlaststrom eine immer kleinere Rolle.

Für den Aufbau von Photovoltaikkapazitäten stehen grundsätzlich zwei verschiedene Standortkonzepte zur Wahl. Zum Einen Anlagen an und auf Gebäuden und zum Anderen nicht an Gebäude gebundene Freiflächenanlagen. Innerhalb einer Stadt stellen Dachflächen für die Nutzung von Globalstrahlung zur teilweisen Deckung der Strom- vor allem aber der Wärmenachfrage ein wichtiges Potential dar. In den Modellen treten aufgrund der hohen Integration von solarer Wärme in den Gebäudewärmesektor solarthermische Anlagen in Flächenkonkurrenz zu Photovoltaik Dachanlagen. Diesbezüglich erscheint es sinnvoll Dachflächen vorrangig für solarthermische Anlagen zu nutzen. Für Dachflächen im Fernwärmegebiet herrscht diese Flächenkonkurrenz dagegen nicht, da Wärme aus Solarthermieanlagen im Allgemeinen nicht wirtschaftlich mit Fernwärme kombiniert werden kann. Diesbezüglich sollten bei der Einbindung von Dachflächen in einen städtischen Energiefahrplan Dächer in einem bestehenden bzw. potentiellen Fernwärmegebiet vorrangig für Photovoltaikanlagen, außerhalb dieses Gebiets vorrangig für solarthermische Anlagen vorbehalten sein.

Für den Fall hoher Emissionen im Importstrom wird in Stadtgebieten mit ausreichend hoher Wärmenachfragedichte im Gegensatz zu obigem Fall auch im Jahr 2050, trotz stark steigenden spezifischen Leitungskosten aufgrund der verminderten Wärmenachfrage (vgl. Abschnitt 5) ein Fernwärmenetz betrieben. Grund hierfür ist das Reduktionspotential der (auf Erdgas basierenden) Kraft-Wärme-Kopplung bei der Verdrängung von „CO₂ intensivem“ Strom. Daneben spielt das gute Zusammenspiel von Strom aus Kraftwärmekopplung und Solarstrom aufgrund ihrer im Allgemeinen antikorrelierten Verfügbarkeit eine tragende Rolle. Um diesen positiven Effekt möglichst stark auszunutzen ist es unter Umständen vorteilhaft in verschiedenen Arealen einer Stadt unterschiedliche Wege zur Dekarbonisierung zu forcieren. In Bereichen mit vergleichsweise hoher Wärmenachfragedichte und einem großen Anteil an denkmalgeschützten Gebäuden kann eine Versorgung mit Fernwärme aufwendigen Gebäudesanierungsmaßnahmen vorzuziehen zu sein. Somit können die spezifischen Kapitalkosten für

⁵⁵Stand Februar 2010

das Fernwärmenetz in Teilen der Stadt auf einem vertretbarem Niveau gehalten werden (vergleiche Stadtzentrum Abbildungen 5.4). In anderen Stadtteilen, besonders im Bereich Neubau sollten demgegenüber besonders hohe wärmetechnische Standards angesetzt werden.

Die Kraft-Wärme-Kopplung

Insgesamt zeigt sich die Kraft-Wärme-Kopplung in den optimierten Modellen langfristig eher als eine Brückentechnologie. In den Szenarien mit moderaten Reduktionszielen für die Emission von Kohlendioxid und eher hohen spezifischen Emissionen im, in die Stadt importierten Strom kann die Kraft-Wärme-Kopplung sowohl zentral als auch dezentral Vorteile generieren. Bei sinkenden spezifischen Emissionen beim Stromimport, steigenden Sanierungsraten im Gebäudesektor oder ambitionierten Reduktionszielen wird die Kraft-Wärme-Kopplung nur in sehr beschränktem Rahmen von der Optimierung berücksichtigt.

Das Ziel der Bundesregierung einen Anteil an KWK-Strom von 25% zu erreichen wird für das Jahr 2050 einzig im Szenario mit spezifischen Emissionen im Importstrom von 580 g/kWh, einer Sanierungsrate von 1% pro Jahr und einem Reduktionsziel für CO₂ von -60% bezogen auf das Jahr 2010 als optimal angesehen. In allen anderen Szenarien ist der optimale Anteil teils deutlich geringer.

Unabhängig von den Rahmenbedingungen wird in den Modellen nahezu ausnahmslos sämtliche verfügbare Biomasse zur Energieversorgung genutzt. Ebenso wird mit steigenden Reduktionszielen ausnahmslos die Kapazität an solarthermischen Anlagen erhöht. Dies führt im Sommer zu einer teilweise drastischen Überkapazität für dezentrale Wärme. Für Szenarien mit geringen spezifischen Emissionen von Kohlendioxid im Importstrom werden Wärmepumpen zur Wärmeproduktion verwendet.

Bodenmodell

Im Teil III wurde die Technologie Wärmepumpe, insbesondere der Entzug von Umweltwärme aus dem Boden betrachtet. Dazu wurde ein Wärmeflussmodell programmiert. Mit diesem Bodenmodell konnte die Auswirkung des Wärmeentzugs auf den Boden für Modellbeispiele berechnet werden.

Es zeigt sich, dass dem Boden durch oberflächennahe Flächenkollektoren entzogene Wärme zum größten Teil⁵⁶ innerhalb kurzer Zeit durch einen erhöhten Wärmefluss über die Bodenoberfläche wieder regeneriert wird. Der erhöhte Wärmefluss in den Boden resultiert aus den geringeren Temperaturen der obersten Bodenschichten und somit aus einem höheren Temperaturgradienten an der Oberfläche. Unterhalb des Kollektors bildet sich über die Jahre eine Region mit verringerter Bodentemperatur aus. Nach Beendigung des Wärmebezugs durch die Wärmepumpe kommt es zu einer allmählichen Regeneration der Bodentemperaturen (Abbildung 11.15). In der Kollektorebene hat der Wärmeentzug keine kontinuierliche Reduktion der Bodentemperaturen zur Folge. Dementsprechend bleibt die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe über die Jahre nahezu konstant.

Wird eine vertikale Erdsonde zum Wärmeentzug gewählt geht die Regeneration des Bodens erheblich langsamer von statten. In diesem Fall fließt nur ein kleiner Teil der, dem Boden entzogenen Wärme⁵⁷ über die Bodenoberfläche wieder nach. Es bildet sich ein Kältetrichter im Bereich um die Sonde⁵⁸. Das

⁵⁶im Schnitt mehr als 90% der jährlich entzogenen Wärme

⁵⁷im Szenario *EFH i* im Schnitt über alle Betriebsjahre 18% der insgesamt entzogenen Wärmemenge

⁵⁸vorausgesetzt, dass keine horizontalen Grundwasserflüsse zu einem zusätzlichen Wärmetransport führen.

ausbilden dieses Kältetrichters hat eine über die Jahre kontinuierliche Reduktion der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe zur Folge. Für die Betrachtung der Regeneration der Bodentemperaturen wurden die Modelle bis 5 Jahre nach Ende des Wärmepumpenbetriebs simuliert. Innerhalb dieser Zeitspanne von fünf Jahren fließt in etwa die Energiemenge in den Boden nach⁵⁹, die im ersten Betriebsjahr entzogen wurde. Eine vollständige Regeneration würde einige Dekaden in Anspruch nehmen. Jedoch zerfließt der Kältetrichter relativ schnell im Boden. Bereits nach dem fünften Regenerationsjahr ist die Temperatur im Boden selbst im Sondenbereich um maximal $0,5^{\circ}\text{C}$ abgesenkt.

Sowohl für den Entzug mittels horizontalem Bodenkollektor als auch mittels vertikaler Bodensonde wurde eine maximale spezifisch Entzugsleistung bestimmt. Diese maximale spezifische Entzugsleistung ist die Wärmemenge die pro Jahr dem Boden regenerativ entzogen werden kann. Sie liegt für beide Fälle bei ca. $4\text{--}5\text{ kWh/a}$ je Quadratmeter nicht überbauter Bodenoberfläche ermittelt. Dementsprechend können Stadtregionen mit einer Wärmebedarfsdichte unterhalb von ca. $40\text{ MWh}/(\text{a ha})$ ausschließlich mit Wärmepumpen⁶⁰ versorgt werden.

Abbildungen 11.53 zeigen die Anteile an Wärme die mittels der Technologie der Wärmepumpe für

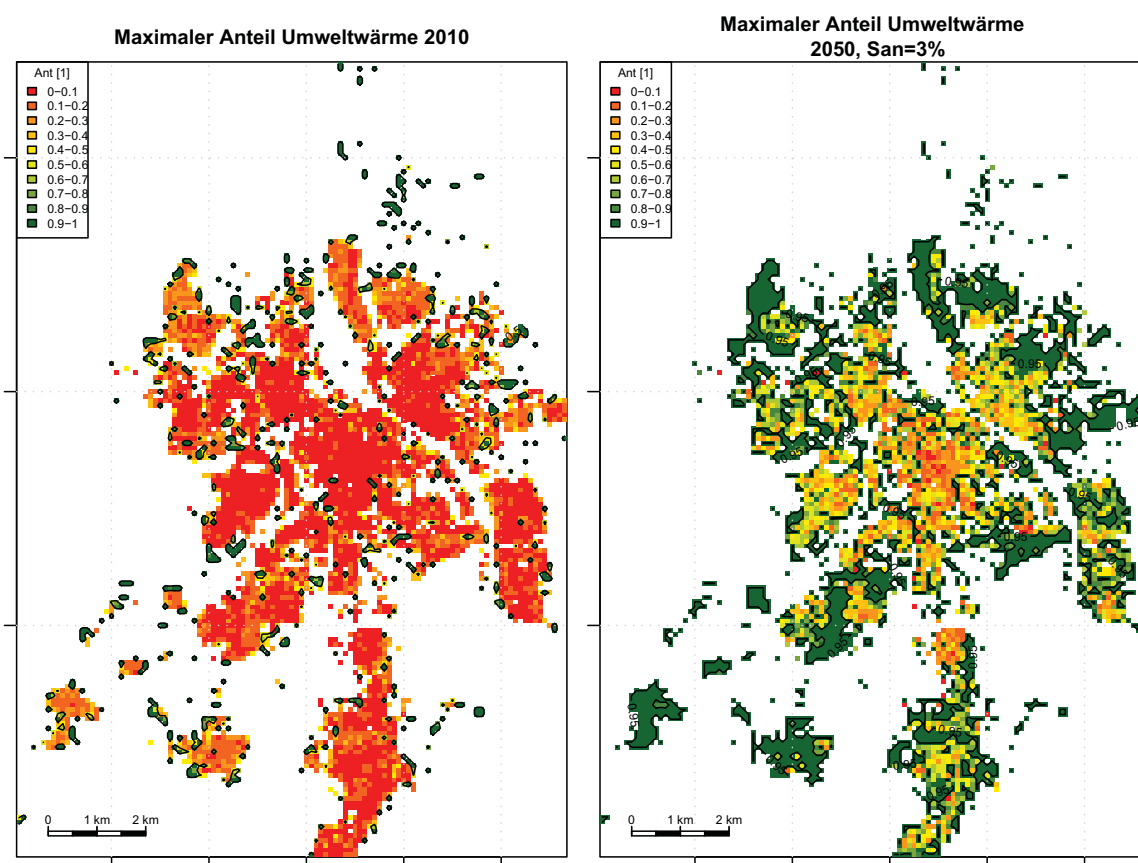


Abbildung 11.53.: Anteil der Wärmenachfrage die regenerativ mittels Wärmepumpe bereitgestellt werden kann. Links: Jahr 2010. Rechts: Jahr 2050 Sanierungsrate 3%.

die Beheizung ganzer Stadtteile bereitgestellt werden könnte. Begrenzt wird dieser Anteil durch die

⁵⁹bzw. ist der Wärmefluss aus dem Boden über die Bodenoberfläche um diesen Anteil vermindert

⁶⁰mit Umweltwärme aus dem Erdreich

Wärmemenge die dem Boden unter regenerativen Gesichtspunkten maximal entzogen werden kann. Es zeigt sich dass das Potential für eine flächendeckende Versorgung über Wärmepumpen heute relativ gering und auf Randzonen der Stadt beschränkt ist. Bei einer deutlichen Reduktion der Wärmenachfrage anhand verbesserter Wärmestandards können weite Teile der Stadt vollständig mit Wärmepumpensystemen versorgt werden.

In weiteren Simulationen wurde untersucht, wie die Speicherwirkung des Bodens genutzt werden kann um die enorme sommerliche Überproduktion an Wärme aus Solarthermieanlagen der Optimierungsszenarien aus Teil II nutzbar zu machen. Hier zeigt sich die Kombination aus Wärmeeinspeisung in den Boden und anschließender Nutzung dieser Wärme mittels Wärmepumpe als geeignet. Durch die Einspeisung der Wärme in den Boden kann die Temperatur im Kollektorbereich im Sommer erhöht werden. Gelingt es diese Wärme am schnellen Abfließen zu hindern führt die Wärme zu einer Steigerung der Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe. Diese Kombination führt in den Modellen zu einer Reduktion des Primärenergiebedarfs und somit der Emissionen an Kohlendioxid. Es zeigte sich in den Szenarien, dass sich oberflächennahe horizontale Flächenkollektoren nicht eignen um Wärme zu speichern, da diese schnell über die Bodenoberfläche wieder abfließt. Demgegenüber kann mit Erdsonden eine deutlich höhere Speicherwirkung erzielt werden solange keine Grundwasserflüsse Wärme abtransportieren. In einem weiteren Modellszenario konnte aufgezeigt werden, dass bei einer Verlegung eines horizontalen Flächenkollektors unterhalb der Bodenplatte eines Gebäudes die Wärme in ausreichender Form am schnellen Abfließen gehindert werden kann. Für dieses System scheint die Wahrscheinlichkeit nicht in Grundwasser führende Schichten zu ragen deutlich höher.

Zusammenfassung

Anhand der verschiedenen Modelle aus den Teilen dieser Arbeit zeigt sich, dass für eine nachhaltige Gestaltung eines städtischen Energiesystems eine Aufteilung der Stadt in verschiedene Bereiche sinnvoll und notwendig ist. Das wichtigste Merkmal für die Einteilung in Bereiche stellt die Wärmenachfragedichte und deren Entwicklung dar. Für die unterschiedlichen Bereiche ergeben sich für eine möglichst nachhaltige Energieversorgung unterschiedliche Strategien. In Augsburg sollte mittel- bis langfristig im Stadtzentrum mit hoher Wärmedichte und einem hohen Anteil an historischen Gebäuden ein Fernwärmesystem betrieben werden. Dabei ist eine möglichst hohe Anschlussquote anzustreben. Ob das Fernwärmegebiet ausgebaut, beibehalten oder rückgebaut werden sollte ist vornehmlich von den zu erwartenden Kosten und Emissionen des importierten Stroms abhängig. Je höher die spezifischen Emissionen im eingekauften Strom desto eher kann das Fernwärmegebiet gehalten oder ausgebaut werden. Bei sehr niedrigen Emissionen im Importstrom stellt das auf Erdgas und Kraft-Wärme-Kopplung basierende Fernwärmenetz eher eine Brückentechnologie dar. Energetische Gebäudesanierungen können einen großen Beitrag zur Reduktion der Emissionen beitragen. Im Gesamtsystem haben energetische Sanierungen außerhalb des Fernwärmegebiets einen größeren Nutzen. Neben der Sanierung von Gebäuden hat die Integration von Biomasse und solarthermie in die Wärmeerzeugung ein entscheidendes Potential zur Reduktion von CO₂ Emissionen.

Im Elektrizitätssektor können Wind und Photovoltaik einen deutlichen Beitrag einer nachhaltigen Stromerzeugung leisten. Beide Technologien sollten langfristig regional ausgebaut werden.

Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden einige Fragestellungen aufgeworfen, die während der Bearbeitungszeit nicht letztlich geklärt werden konnten.

So wird in Teil I beschrieben, dass ältere Gebäude in der Realität einen niedrigeren Wärmebedarf aufweisen als nach der Berechnung, neuere Gebäude einen höheren. Daneben wurde in Kapitel III (Periodische Anregung von Schichten) aufgezeigt dass U-Werte bei periodischen Rahmenbedingungen nicht alleinig die Eigenschaften einer Wand korrekt beschreiben. Der Tag- Nacht Rhythmus kann in erster Näherung durch periodische Rahmenbedingungen beschrieben werden. In weiterer Recherche könnte diesbezüglich ein Zusammenhang untersucht werden.

Weiter war es nicht möglich mit den Ergebnissen des Teils III, vorwiegend der Einspeicherung von sommerlichen Wärmeüberschüssen in den Boden und der Nutzung mittels Wärmepumpe die Optimierungsmodelle des Teils II erneut zu rechnen. Diese Option läßt vermuten, dass die Wärmepumpentechnologie deutlich stärker genutzt werden würde.

Ein Punkt der vor der Optimierung der Szenarien im Teil II deutlich zu gering eingeschätzt wurde ist die rasante Entwicklung des spezifischen Installationsaufwand für Photovoltaikanlagen. Hier wird vermutlich bereits bis ins Jahr 2015 das Kostenniveau erreicht das für die Entwicklung bis ins Jahr 2050 angenommen wurde. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass Photovoltaik eine deutlich größere Rolle spielen kann, als in den Modellen ermittelt wurde.

Literaturverzeichnis

- [BRU 2001] AG, Brugg R. (Hrsg.): *Rohrsysteme Wärmeverluste FHK 3.203*. http://www.pipesystems.com/site/index.cfm?id_art=21909&actMenuItemID=10807&vsprache/DE/BRUGG_Rohrsysteme___Spezialli.cfm. Version: 2001
- [VDI 2001] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.): *VDI 4640, Thermische Nutzung des Untergrundes, Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*. http://www.vdi.de/uploads/tx_vdirili/pdf/9197793.pdf. Version: 2001
- [KWK 2002] *Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz)*. 2002. – Stand 21.8.2009
- [UBA 2007] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): *Wirkung der Meseberger Beschlüsse vom 23.08.2007 auf die Treibhausgasemission in Deutschland im Jahr 2020*. Dessau, 2007
- [Aug 2008] STADT AUGSBURG, REFERAT 2 UMWELT UND ENERGIE, FORSTEN KOMMUNALES (Hrsg.): *Klimaschutzbericht 2008, Teil B) CO₂-Billanz und Indikatoren*. http://www.augsburg.de/fileadmin/www/dat/04um/klischutz/Klschbericht/Klimaschutzbericht_2008_B.pdf. Version: 2008
- [Bun 2008] BUNDESREGIERUNG (Hrsg.): *Magazin für Verbraucher, Wer dämmt, gewinnt: die energetische Gebäudesanierung*. <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Magazine/MagazinVerbraucher/002/s2-die-energetische-gebaeudesanierung.html>. Version: 2008
- [Bay 2009] OBERSTE BAUBEHÖRDE IM BAYERISCHEN STAATSMINISTERIUM DES INNEREN (Hrsg.): *Gebäude + Energie: Förderprogramme*. <http://www.stmi.bayern.de/bauen/themen/gebaeude-energie/16546/>. Version: 2009
- [UBA 2010] UMWELTBUNDESAMT, Fachgebiet I. 2. 5. (Hrsg.): *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2008 und erste Schätzung 2009*. <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf>. Version: 2010. – Stand: März 2010
- [BMV 2010] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (BMVBS) (Hrsg.): *Wohnen und Bauen in Zahlen 2009/2010*. <http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Publikationen/BauenUndWohnen/wohnen-und-bauen-in-zahlen-2009-2010.html>. Version: 2010
- [A. Peters 2010] A. PETERS ; GREENPEACE E.V. (Hrsg.): *Kohlekraftwerke in Bau oder Planung, Stand Februar 2010*. http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/klima/Kohlkraftwerke_im_Bau_und_in_Planung_02_2010.pdf. Version: 2010

- [Baehr u. Stephan 2006] BAEHR, H. D. ; STEPHAN, K.: *Wärme- und Stoffübertragung*. 5. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2006
- [BMW 2009a] BMW (Hrsg.): *Energie in Deutschland, Trends und Hintergründe zur Energieversorgung*. 2009. – Stand 08.05.2009
- [BMW 2009b] BMW (Hrsg.): *Energiedaten: Zahlen und Fakten: Nationale und Internationale Entwicklung*. 2009. – Stand 23.10.2009
- [BP 2009] BP (Hrsg.): *BP Statistical Review of World Energy June 2009*. 2009
- [Davies 1994] DAVIES, M. G.: The Thermal Response of an Enclosure to Periodic Excitation: The CIBSE Approach. In: *Building and Environment* 29 (1994), Nr. 2, S. 217–235
- [Davies 1995] DAVIES, M. G.: Solutions to Fourier's Equation and Unsteady Heat Flow through Structures. In: *Building and Environment* 30 (1995), Nr. 3, S. 309–321
- [Demtröder 2006] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik I: Mechanik und Wärme: neu bearbeitete und aktualisierte Auflage*. 4. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006
- [DENA 2008] DENA (Hrsg.): *Kurzanalyse der Kraftwerks- und Netzplanung in Deutschland bis 2020 (mit Ausblick auf 2030). Annahmen, Ergebnisse und Schlussfolgerungen*. Berlin, 2008
- [desertec 2011] <http://www.desertec.org/de/>
- [DIN 4108] Norm DIN 4108 . *Wärmeschutz im Hochbau*
- [DIN 4708 1994] Norm DIN 4708 1994. *Zentrale Wassererwärmungsanlagen; Regeln zur Ermittlung des Wärmebedarfs zur Erwärmung von Trinkwasser in Wohngebäuden*
- [DIN EN 12831] Norm DIN EN 12831 . *Heizungsanlagen in Gebäuden, Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast*. – Heizungsanlagen in Gebäuden, Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast
- [EEG 2008] *Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG)*. 2008
- [EEWG 2008] *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG)*. 2008. – Stand 15.07.2009
- [EnEV 2007] *Verordnung über einsparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden: Energieeinsparverordnung - EnEV*. 2007
- [EnEV 2009] *Verordnung über einsparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden: Energieeinsparverordnung - EnEV*. 2009
- [EnWG 2005] *Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG)*. http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/enwg_2005/gesamt.pdf. Version: 2005. – Stand, 4.11.2010
- [Gleich 2008] GLEICH, Andreas ; STADT AUGSBURG (Hrsg.): *Statistisches Jahrbuch der Stadt Augsburg 2007/2008*. http://www2.augsburg.de/fileadmin/www/dat/01au/statistik/Jahrbuch/2007_08_Kapitel/_3_Bau-_und_Wohnungswesen.pdf. Version: 2008

- [Grad 2008] GRAD, Max: *Bayerns Klima im Wandel - erkennen und handeln*. 2. aktualis. Aufl. Augsburg : Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2008 (UmweltThemaKlimawandel). – ISBN 9783940009739
- [Grotz 2009] GROTZ, Bernhard: *Untersuchung der Korrelationen zwischen Wind- und Solarangebot mit spezieller Berücksichtigung von Extremwetterlagen*. Diplomarbeit, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Augsburg, 2009
- [Heitmann 2005] HEITMANN, Nina: *Lösung energiewirtschaftlicher Probleme mit Hilfe linearer Programmierung*. Universität Augsburg, 2005. – Diplomarbeit
- [Herrmann 2006] HERRMANN, Joachim: Diplomarbeit: Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Potential von klein- Blockheizkraftwerken. (2006)
- [Hertel 2009] HERTEL, Mark: Regionaler Energieverbund - Vernetzung von Energieerzeugern und -verbrauchern. In: *bifa Aktuell* 2.2009 (2009). www.bifa.de/userfiles/files/bifa%20aktuell12.2009web.pdf
- [Huber 1999] HUBER, Arthur ; BUNDESAMT FÜR ENERGIE SCHWEIZ (Hrsg.): *Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie?: Schlussbericht*. 1999 (Programm Geothermie 33 206)
- [IEKP 2007] BUNDESREGIERUNG (Hrsg.): *Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm: Meseberger Beschlüsse*. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/klimapaket_aug2007.pdf. Version: 2007
- [IPCC 2008] IPCC (Hrsg.): *Climate Change 2007: Synthesis Report*. 2008
- [IWU 2003] IWU ; IWU (Hrsg.): *Gebäudetypologie - Stand Dez 2003.doc*. Darmstadt, 2003
- [Jagnow u. Wolff 2003] JAGNOW, K. ; WOLFF, D. ; WIRTSCHAFTSDIENST, Deutscher (Hrsg.): *Bestimmung von Wärmeerzeugern, Speichern und Heizflächen*. 2003
- [Kuttler 2009] KUTTLER, W. ; DWD (Hrsg.): *Klimastatusbericht 2008: Zum Klima im urbanen Raum*. 2009
- [Larsen u. a. 2009] LARSEN, Silvana F. ; FILIPPIN, Celina ; LESINO, Graciela: Thermal behavior of building walls in summer: Comparison of available analytical methods and experimental results for a case study. In: *Build Simul* 2 (2009), Nr. 1, S. 3–18
- [Larsson u. Thomée 2006] LARSSON, Stig ; THOMÉE, Vidar: *Partielle Differentialgleichungen und numerische Methoden: Übersetzt von Micaela Krieger-Hauwede*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2006. – ISBN 3–540–20823–2
- [LfL 2009] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (Hrsg.): *Agrarmeteorologisches Messnetz Bayern - Wetterdatenabruf: Wetterstation Nr.59, Schwabmünchen: Regbez: Schwaben Lkr: Augsburg (A) Gemeinde: Schwabmünchen, St.; (772200)*. <http://www.lfl.bayern.de/agm/daten.php?statnr=59>. Version: 2009
- [Linder 2010] LINDER, Christian: *Konzept zur Erstellung kommunaler Gebäudedatenbanken in Bayern - Datenlagegrundlagen und Umsetzung am Beispiel Augsburgs*. Universität Augsburg, 2010
- [Loga 2001] LOGA, Tobias ; IWU (Hrsg.): *EPHW-Toolbox: Arbeitshilfe und Ergänzungen zum Energiepass Heizung/Warmwasser*. 2001

- [Maegaard 2010] MAEGAARD, Preben: *Präsentation: Excess electricity used for heat generation: the case of Denmark*. Berlin, 2010. – 5th International Renewable Energy Storage Conferenc (IRES 2010)
- [Ramming 2007] RAMMING, Klaus: *Bewertung und Optimierung oberflächennaher Erdwärmekollektoren für verschiedene Lastfälle*. Dresden, TU Dresden, Diss., 2007
- [Reiter u. a. 2009] REITER, Daniel ; BOTZENHART, Florian ; MÜHLICH, Pascal ; HAMACHER, Thomas ; REUTER, Albrecht: *Developing a Roadmap for the Future Energy Infrastructure in Salzburg*. (2009)
- [Richter 2004] RICHTER, Stephan: *Entwicklung einer Methode zur integralen Beschreibung und Optimierung urbaner Energiesysteme. Erste Anwendung am Beispiel Augsburg*. Augsburg, Universität Augsburg, Diss., 2004
- [Schuberth u. Kaschenz 2008] SCHUBERTH, Jens ; KASCHENZ, Helmut ; UMWELTBUNDESAMT, Fachgebiet I. 2. 4. E. (Hrsg.): *Elektrische Wärmepumpen – eine erneuerbare Energie?: Wie ist die Umweltbilanz elektrischer Wärmepumpen im Vergleich zu anderen Heizungssystemen?* Dessau, 2008
- [Sorrell 2007] SORRELL, Steve ; UMWELTBUNDESAMT, Fachgebiet I. 2. 4. E. (Hrsg.): *The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency*. Dessau, 2007
- [Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen 2006] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN: *VDI-Wärmeatlas: Zehnte, bearbeitete und erweiterte Auflage*. 10. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2006
- [Wetzell 2004] WETZELL, Otto W.: *Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln*. 31. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, Berlin, Wien, Zürich : Beuth Verlag, 2004. – ISBN 3–519–55002–4
- [Winkelmüller 2006] WINKELMÜLLER, Stefan: *Optimierung der Nachfrage- und Erzeugungsstruktur kommunaler Energiesysteme am Beispiel von Wien*. Augsburg, Universität Augsburg, Diss., 2006

12. Anhang

12.1. zu Wärmeatlas

12.1.1. zu Transmission

Bei der Trennung zweier Fluide durch eine Wand ergibt sich ein Temperatenausgleich zwischen beiden Volumen durch Wärmeleitung bis sich im Gleichgewicht eine Mischtemperatur in beiden Volumina einstellt. Der Wärmestrom Φ_T durch die Trennwand kann¹ durch die Gleichung

$$\Phi_T(t) = \frac{\Delta T(t)}{R} \quad (12.1)$$

mit

- Φ_T Wärmestrom durch Transmission [W],
- R thermischer Widerstand der Wand [K/W],
- ΔT Temperaturunterschied zwischen den beiden Fluiden [K]

beschrieben werden. Dabei spielen neben den Leitungseigenschaften der festen Trennwand die Übergänge zwischen Luft und Wand eine Rolle.

Besteht die Trennwand aus mehreren hintereinander liegenden Schichten addieren sich die Einzelwiderstände R_i . Beim Übergang Fluid \leftrightarrow Wand \leftrightarrow Fluid gilt somit

$$\Phi_T = \frac{1}{R_{\text{Fluid1} \leftrightarrow \text{Wand}} + R_{\text{Wand}} + R_{\text{Wand} \leftrightarrow \text{Fluid2}}} \Delta T. \quad (12.2)$$

Die Wärmeleitfähigkeit von Luft $\lambda_L = 0,0261 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ist relativ gering². Jedoch wird aufgrund der Konvektion ein deutlich höherer Abtransport von Wärme von der Oberfläche erreicht. Eine Beschreibung der freien Konvektion ist beispielsweise in Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (2006)³ zu finden.

freie Konvektion: Beschrieben wird der Wärmeübergang zwischen Oberfläche und Fluid durch den Wärmeübergangskoeffizienten α . Typische Wärmeübergangswiderstände $R = \alpha^{-1}$ sind dabei

¹unter Vernachlässigung der Speicherkapazität der Wand bzw. im thermischen Gleichgewicht bei konstanten Oberflächentemperaturen

²Dämmstoffe haben eine Wärmeleitfähigkeit von ca. $0,03 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

³Abschnitt Fa

in Abhängigkeit vom Wandtyp in Wetzell (2004)⁴ gegeben und liegen beispielsweise für eine senkrechte Außenwand bei $0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$. Im Folgenden soll der Wärmeübergangskoeffizienten α der freie Konvektion berechnet werden. Es gilt

$$\alpha = \frac{1}{R} = \frac{Nu \lambda}{l} \quad (12.3)$$

mit

- Nu Nußelt-Zahl,
- λ Wärmeleitfähigkeit des Fluids,
- l Anströmlänge.

Die Nußelt-Zahl ist abhängig von der Form der Fläche und eine Funktion der Rayleigh-Zahl Ra

$$Nu = f(Ra). \quad (12.4)$$

Dabei ist die Rayleigh-Zahl $Ra = Gr \cdot Pr$ mit der Grashof-Zahl Gr und der Prandtl-Zahl Pr . Beides sind dimensionslose Größen zur Beschreibung thermischer Eigenschaften von Fluiden.

$$Pr = \frac{\nu}{\lambda_T} = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (12.5)$$

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta T \quad (12.6)$$

- ν kinematische Viskosität des Fluids,
- λ_T Temperaturleitfähigkeit,
- η dynamische Viskosität des Fluids,
- c_p spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck,
- g Erdbeschleunigung,
- β räumlicher Wärmeausdehnungskoeffizient des Fluids (mit $\beta = T_{\text{Fluid}}^{-1}$)
- l Anströmlänge,
- ΔT Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Fluid.

Für eine vertikale ebene Fläche wird nach Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (2006)⁵ „der mittlere dimensionslose Wärmeübergagskoeffizient für den laminaren und auch für den turbulenten Strömungsbereich von $Ra = 10^{-1}$ bis $Ra = 10^{12}$ durch

$$Nu = \left\{ 0,825 + 0,387 [Ra \cdot f_1(Pr)]^{1/6} \right\}^2 \quad (12.7)$$

beschrieben. Die Funktion $f_1(Pr)$ berücksichtigt den Einfluß der Prandtl-Zahl“

$$f_1(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}. \quad (12.8)$$

Für Luft mit $Pr = 0,70$ ergibt sich $f_1(0,70) = 0,345$ und somit für die freie Konvektion an einer Wand (im Beispiel 2,5 m) ein Wärmeübergangswiderstand wie in Abbildung 12.1 zu sehen.

⁴Tafel 16, Abschnitt 4, Seite 181

⁵Abschnitt Fa, Kapitel 2

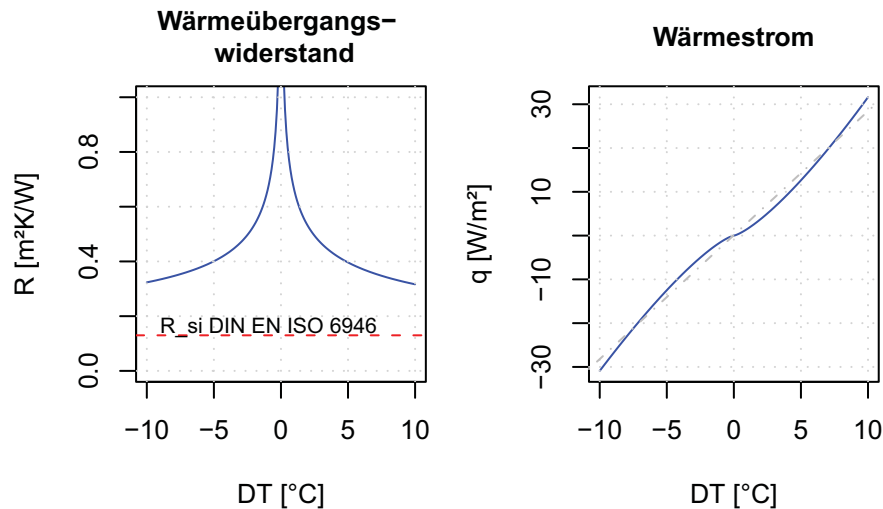


Abbildung 12.1.: Wärmeübergangswiderstand bzw. Wärmestrom in Abhängigkeit des Temperaturunterschiedes zwischen Oberfläche und Raumluft

externe Konvektion: Neben der freien Konvektion spielt die externe Konvektion eine entscheidende Rolle. Die externe Konvektion wird ebenso durch einen, die wechselwirkende Oberfläche umströmenden Massestrom getrieben. Der Antrieb für den Massestrom ist dabei nicht der Wärmestrom durch die Oberfläche, wie bei der freien Konvektion. Für diese Arbeit spielt vor allem die externe Konvektion an Gebäuden aufgrund der Windverhältnisse eine Rolle.

Wärmestrahlung: Oberflächen senden Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung in den Halbraum aus. Die Intensität der Strahlung ist dabei von der Temperatur der Oberfläche T_O und deren Emissivität ϵ abhängig. Den Zusammenhang beschreibt das Stefan-Boltzmann Gesetz.

$$P = \epsilon A \sigma T_O^4 \quad (12.9)$$

mit

| | |
|--|-----------------------------|
| $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$ | Stefan-Boltzmann Konstante, |
| A | Fläche der Oberfläche, |
| T_O | Temperatur der Oberfläche, |
| ϵ | Emissivität. |

Komplexer zu bestimmen ist die Aufgenommene Wärme aufgrund der einfallenden Wärmestrahlung der Umgebung. Hier können die Effekte im Normalfall nur abgeschätzt werden. Eine einfache Abschätzung ist, dass die Hälfte des einstralenden Halbraumes von nahen Objekten mit der Umgebungstemperatur als Oberflächentemperatur und die andere Hälfte mit der „Himmelstemperatur“ als Oberflächentemperatur bedeckt ist. Die Temperatur des Himmels ist abhängig vom Bewölkungsgrad. Je stärker die Bewölkung desto größer ist die Strahlungswärme der Atmosphäre durch die Reflexion der Wärmestrahlung der Erdoberfläche beeinflusst. Bei völlig klarem Himmel ist die Strahlungstemperatur⁶ der Atmosphäre ca. -40°C .

⁶ein schwarzer Strahler dieser Temperatur hätte die gleiche Intensität.

12.1.2. DGL Speicherwirkung von Gebäuden

Annahme: konstante Temperaturverteilung im gesamten Gebäude.

Erster Hauptsatz:

$$\delta Q = dU + dW \quad (12.10)$$

mit $dW = 0$.

Mit Heizleistung P_H und thermischen Verlusten P_V :

$$\delta Q = (P_H - P_V) \cdot dt \quad (12.11)$$

und

$$dU = cm \cdot dT = C dT \quad (12.12)$$

=>

$$(P_H - P_V) \cdot dT = C dT \quad (12.13)$$

bzw.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_H - P_V}{C} \quad (12.14)$$

mit:

$$P_V = H_{TL} \Delta T \quad (12.15)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_H - H_{TL} \Delta T}{C} = \frac{P_H - H_{TL}(T - T_U)}{C} \quad (12.16)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_H + H_{TL} T_U}{C} - \frac{H_{TL} T}{C} \quad (12.17)$$

Gleichung (12.17) bestimmt die Reaktion der Temperatur auf die Änderung der Gebäude bzw. Wetterparameter.

Lösungsansatz:

$$\frac{dT}{dt} = u - vT \quad (12.18)$$

mit

$$u = \frac{P_H + H_{TL} T_U}{C} \quad (12.19)$$

und

$$v = \frac{H_{TL}}{C} \quad (12.20)$$

$$\frac{dT}{u - vT} = dt \quad (12.21)$$

$$-\frac{1}{v} \ln(u - vT) = t + C_1 \quad (12.22)$$

$$\ln(u - vT) = -vt - vC_1 \quad (12.23)$$

$$u - vT = e^{-vt - vC_1} \quad (12.24)$$

$$T(t) = -\frac{1}{v} e^{-vt - vC_1} + \frac{1}{v} u \quad (12.25)$$

$$T(t) = -\frac{C_2}{v}e^{-vt} + \frac{1}{v}u \quad (12.26)$$

$$T(t) = -\frac{C_2 C}{H_{TL}}e^{-\frac{H_{TL}}{C}t} + \frac{P_H + H_{TL}T_U}{H_{TL}} \quad (12.27)$$

Bestimmung der Variablen C_2 für

$$T(0) = T_U \quad (12.28)$$

$$C_2 = \frac{P_H}{C} \quad (12.29)$$

ergibt die Lösung der DGL

$$T(t) = T_U + \frac{P_H}{H_{TL}} \left(1 - e^{-\frac{H_{TL}}{C}t} \right). \quad (12.30)$$

Bestimmung der Variablen C_2 für

$$T(0) = T_0 \quad (12.31)$$

$$C_2 = \frac{H_{TL}}{C} \left(T_0 - T_U - \frac{P_H}{H_{TL}} \right) \quad (12.32)$$

ergibt die Lösung

$$T(t) = T_U + \frac{P_H}{H_{TL}} + \left(T_0 - T_U - \frac{P_H}{H_{TL}} \right) e^{-\frac{H_{TL}}{C}t}. \quad (12.33)$$

Programm zur Berechnung mit **R**:

```
Temp<-function(tim)
{
  return<-(TS-TU-PH/HHL)*exp(-HHL*tim/Cap)+PH/HHL+TU
}
TU<-12
TS<-21
PH<-15
HHL<-0.1
Cap=1

plot(Temp,xlim=c(0,100))

names(GebAug)
GebAug[c(1,10,100,1000),c("HT_kor_spez","PHinst","Mant_Vert","GFZ","G")]
Geb<-1
cWand<-2000*879/3600000 #kg/m^3*J/(kg K)=>kWh/m^3K
cBod<-2000*879/3600000 #kg/m^3*J/(kg K)=>kWh/m^3K
Cap<-GebAug$Mant_Vert[Geb]*0.24*cWand+GebAug$GFZ[Geb]*0.24*GebAug$G[Geb]*cBod
Cap
HHL<-(GebAug$HT_kor[Geb]+GebAug$HL[Geb])/1000
HHL
PH<-GebAug$PHinst[Geb]
PH<-0
```

```
plot(Temp,xlim=c(0,24),main="Temperaturverlauf",xlab="Zeit [h]",ylab="T [C]")
grid(nx = NULL, ny = NULL, col = "lightgray", lty = "dotted",lwd = par("lwd")
      , equilogs = FALSE)
abline(h=TS,lty=2)
dTdt<-(PH-HHL*(20-TU))/Cap
dTdt

curve(Temp,xlim=c(0,24),add=TRUE)
```

12.1.3. Wärmeleitungsgleichung

Berücksichtigt man die Wärmekapazität der Trennwand ist der lineare Zusammenhang zwischen $\Phi_T(t)$ und $\Delta T(t)$ aus Gleichung (12.1), die als Grundlage das Fourier'sche Gesetz (9.3) hat, nicht mehr gegeben. Es stellt sich eine zeitliche Verzögerung Δt ein, bis der Wärmestrom die Trennwand durchdringt (siehe Kapitel 9.2 Abschnitt 9.2.3 periodische Rahmenbedingugnen). Die Verzögerung ist durch die thermisch Dicke τ bestimmt. Bei periodischer Anregung einer Wand der Dicke X und der Periodendauer P ergibt sich τ aus

$$\tau = \sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}} X \quad (12.34)$$

mit $\lambda_T = \lambda \cdot c \cdot \rho$ (Herleitung Kapitel 9.2.3). Für eine 20 cm Dicke Dämmschicht ergibt für $P=24$ h eine thermische Dicke τ von 2,7, für eine 2 cm Dicke Fensterscheibe von 0,2. Für die Zeitverzögerung ergeben sich 19 h bzw. 3 min (siehe Tabelle 9.1).

Nach Baehr u. Stephan (2006)⁷ hängt in einer Reihe von Wärmeübergangsproblemen, z.B. bei der freien Konvektion, α von $(T_{\text{Oberf}} - T_{\text{Fluid}})$ ab. In diesem Fall ist eine Lösung des Wärmeleitproblems in geschlossener Form meistens nicht möglich. Gleiches gilt für die Berücksichtigung des Wärmeübergangs durch Strahlung, weil hier Φ_S von T_{Oberf}^4 abhängt. Man wird dann numerische Methoden anwenden. Dies findet im Teil III Berücksichtigung. Im Teil I wird der Effekt vereinfachender weise durch Einführung eines gewichteten, gleitenden Wärmebedarf innerhalb eines statischen Modells berücksichtigt.

⁷Abschnitt 2.1.3, Seiten 124f.

12.1.4. Deutsche Gebäudetypologie

Deutsche Gebäudetypologie nach IWU (2003) (Auszug).

| Dokumentation | | |  INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GmbH Annastraße 15 64285 Darmstadt Telefon: (0648) 06151/2904-0 Telefax: -87 eMail: info@iwu.de Internet: http://www.iwu.de Stand: 22. Juni 2005 | | | | | |
|---|--------------|-----------|---|--|--|---|--|--|
| Deutsche Gebäudetypologie Systematik und Datensätze | | | | | | | | |
| Baualtersklasse | | | EFH | RH | MFH | GMH | HH | |
| A | vor 1918 | Fachwerk | EFH_A  | | MFH_A  | | | |
| B | vor 1918 | | EFH_B  | RH_B  | MFH_B  | GMH_B  | | |
| C | 1919-1948 | | EFH_C  | RH_C  | MFH_C  | GMH_C  | | |
| D | 1949-1957 | | EFH_D  | RH_D  | MFH_D  | GMH_D  | | |
| E | 1958-1968 | | EFH_E  | RH_E  | MFH_E  | GMH_E  | HH_E  | |
| F | 1969-1978 | | EFH_F  | RH_F  | MFH_F  | GMH_F  | HH_F  | |
| G | 1979-1983 | | EFH_G  | RH_G  | MFH_G  | | | |
| H | 1984-1994 | | EFH_H  | RH_H  | MFH_H  | | | |
| I | 1995-2001 | | EFH_I  | RH_I  | MFH_I  | | | |
| J | nach 2002 | | EFH_J  | RH_J  | MFH_J  | | | |
| Sonderfälle | F/F | 1969-1978 | Fertighaus  | | | | | |
| | NBL_D | 1946-1960 | | | NBL_MFH_D  | | | |
| | NBL_E | 1961-1969 | | | NBL_MFH_E  | | | |
| | NBL_F | 1970-1980 | | | | NBL_GMH_F  | NBL_HH_F  | |
| | NBL_G | 1981-1985 | | | | NBL_GMH_G  | NBL_HH_G  | |
| | NBL_H | 1986-1990 | | | | NBL_GMH_H  | | |

© Institut Wohnen und Umwelt GmbH

Abbildung 12.2.: Typisierung der Gebäude nach IWU (2003).

12.1.5. Datenqualität

Darstellung der Verteilung der Vollständigkeit einiger Datensätze.

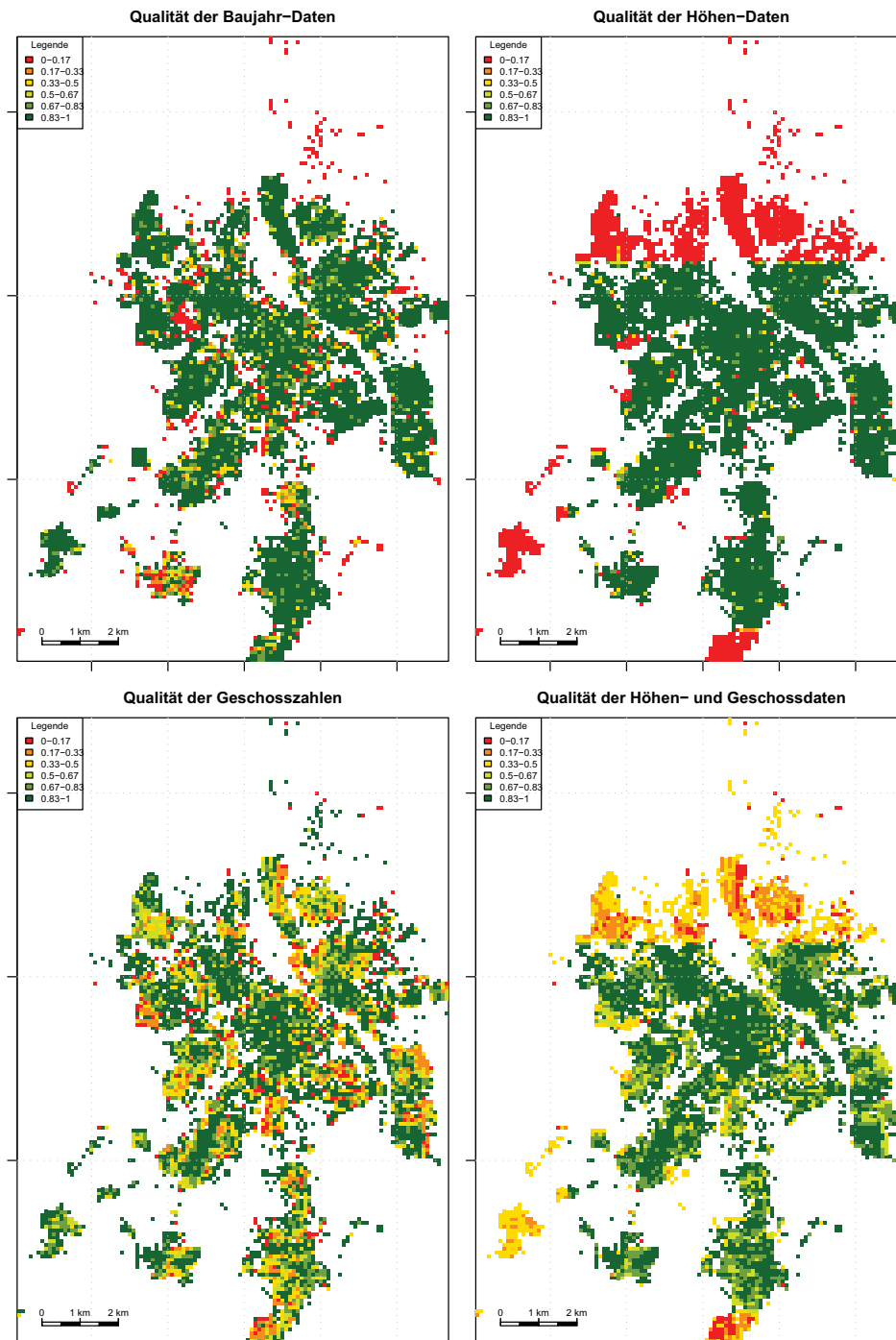


Abbildung 12.3.: Qualität einiger Datensätze.

12.1.6. Grundflächenzahl

Grundflächenzahl für Augsburg als Maß für die Überbauung der Bodenoberfläche.

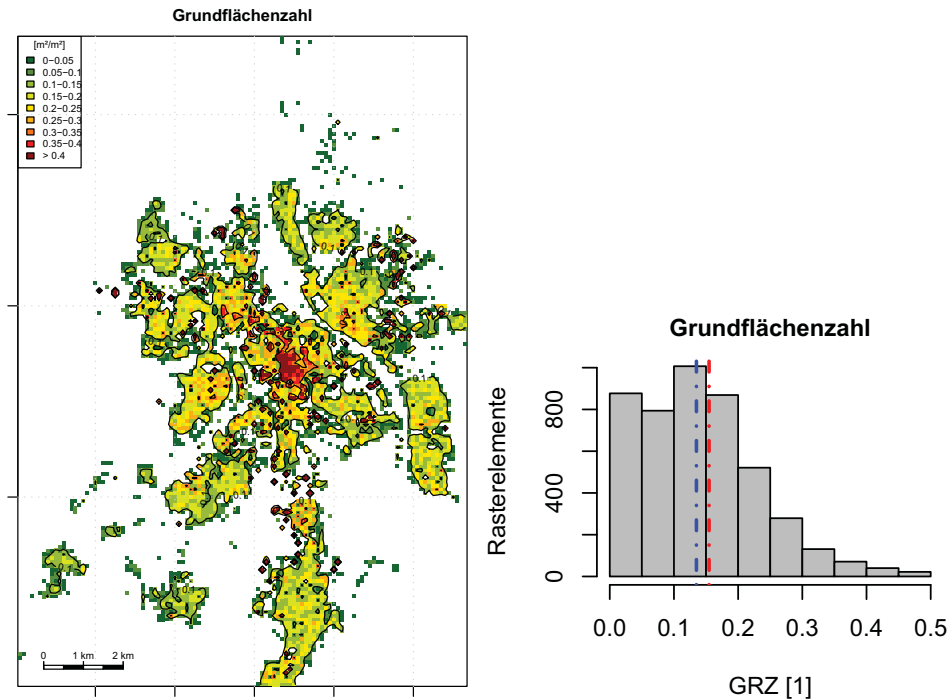


Abbildung 12.4.: Verteilung der Grundflächenzahlen auf das Augsburger Stadtgebiet.

12.1.7. Sanierungsraten

Der Wohnungsbestand in Deutschland liegt bei ca. 40 Mio. Quelle: BMV (2010). Die durch die kfw finanzierten energetische Gebäudesanierungen liegen nach Bun (2008) im Bereich von ca. 400 000 pro Jahr. Dementsprechend werden ca. 1% des Gebäudebestands in Deutschland pro Jahr saniert.

12.1.8. Wärmekarten

Im Folgenden sind weitere Wärmekarten und Karten der spezifischen Leitungskosten für Fernwärme für unterschiedliche Szenarien für Augsburg gegeben.

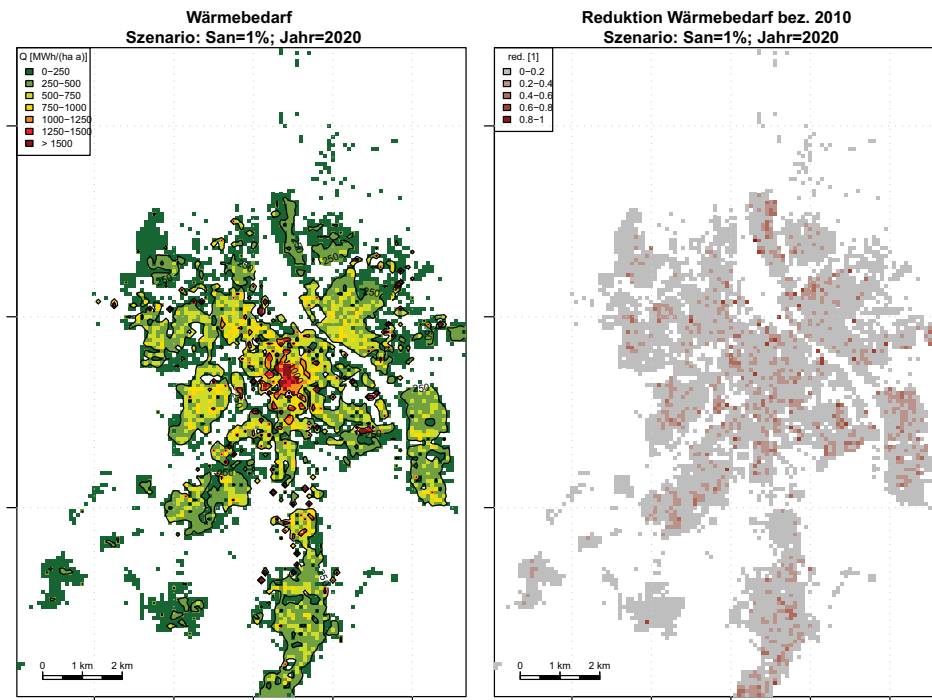


Abbildung 12.5.: Raumwärme- und Warmwasserbedarf 2020 bzw. deren Änderung im Vergleich zum Jahr 2010 für die Augsburger Bestandsgebäude.

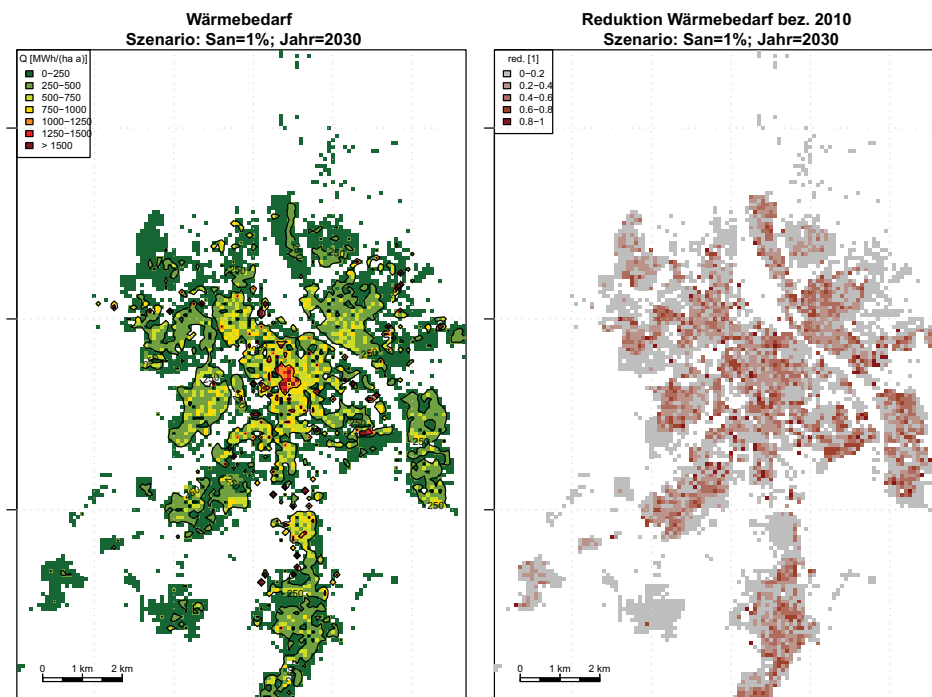


Abbildung 12.6.: Raumwärme- und Warmwasserbedarf 2030 bzw. deren Änderung im Vergleich zum Jahr 2010 für die Augsburger Bestandsgebäude.

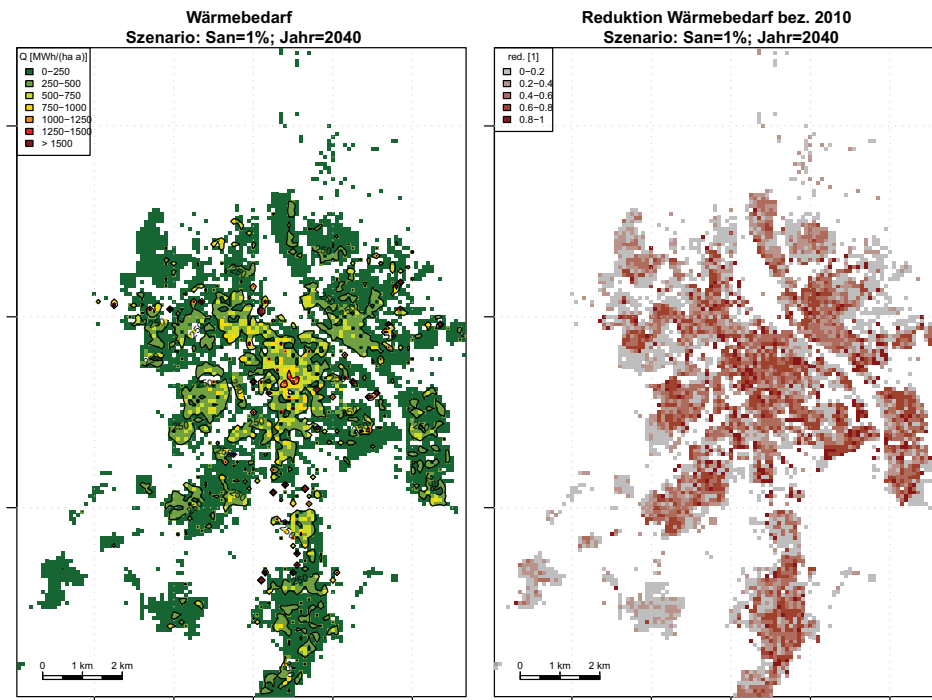


Abbildung 12.7.: Raumwärme- und Warmwasserbedarf 2040 bzw. deren Änderung im Vergleich zum Jahr 2010 für die Augsburger Bestandsgebäude.

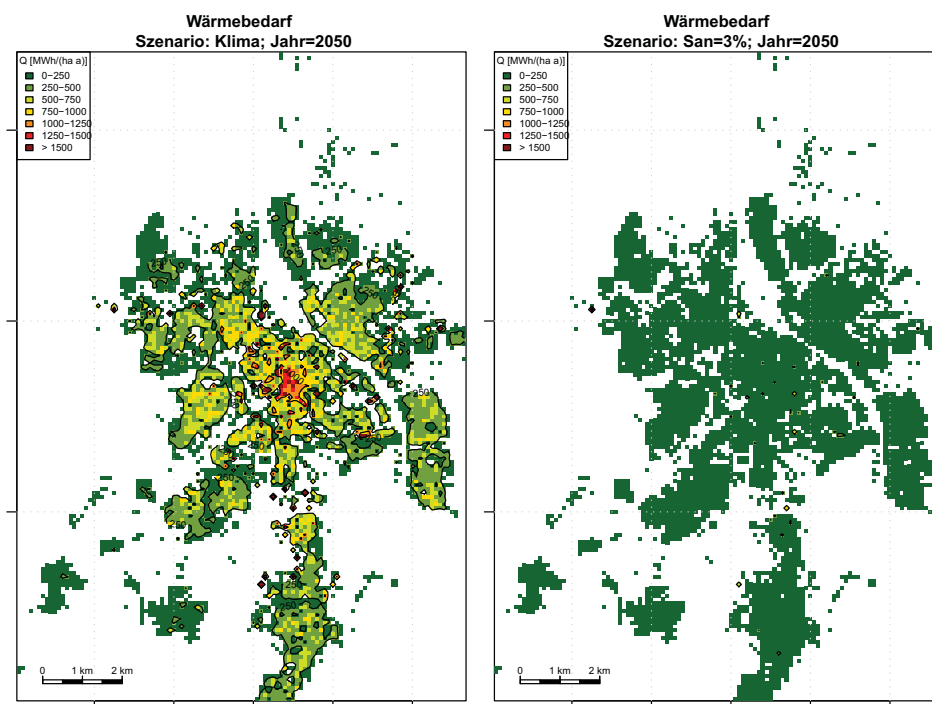


Abbildung 12.8.: Raumwärme- und Warmwasserbedarf 2050 für das Szenario Klima bzw. San=3%.

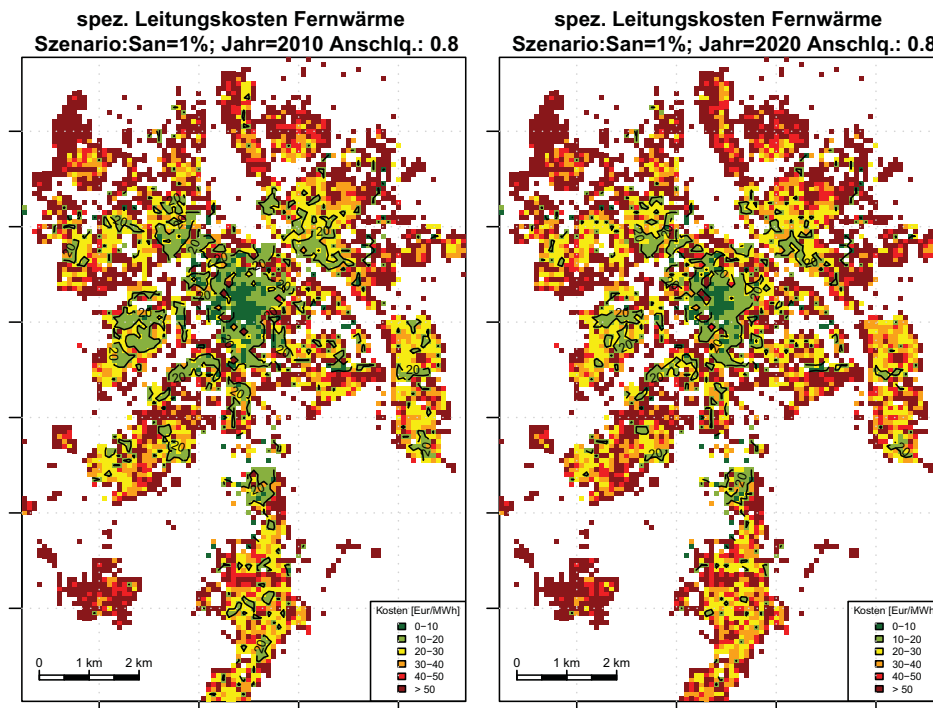


Abbildung 12.9.: Leitungskosten der Fernwärmeversorgung bei einer Anschlußrate von 80% für das Szenario San=1%. Jahr 2010 und 2020.

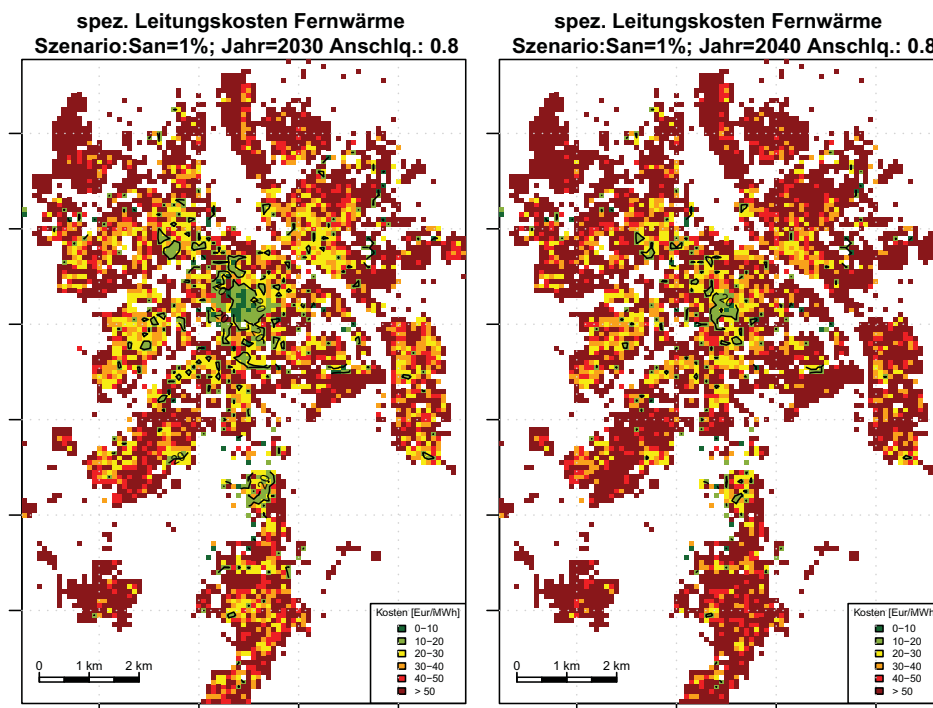


Abbildung 12.10.: Leitungskosten der Fernwärmeversorgung bei einer Anschlußrate von 80% für das Szenario San=1%.Jahr 2030 und 2040.

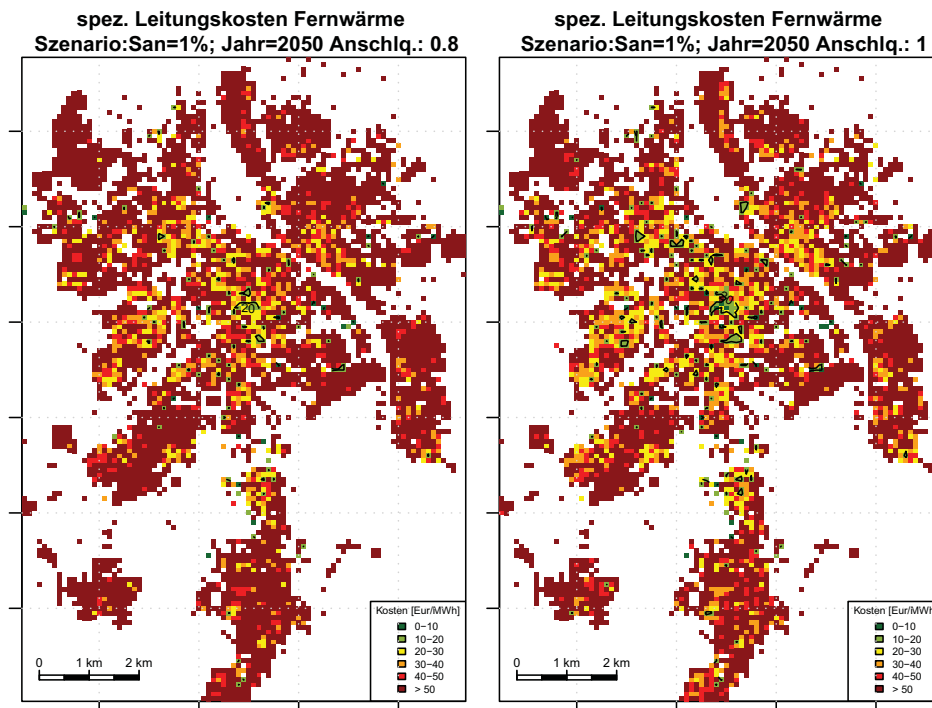


Abbildung 12.11.: Leitungskosten der Fernwärmeversorgung 2050 für das Szenario San=1% bei einer Anschlussrate von 80% bzw. 100%.

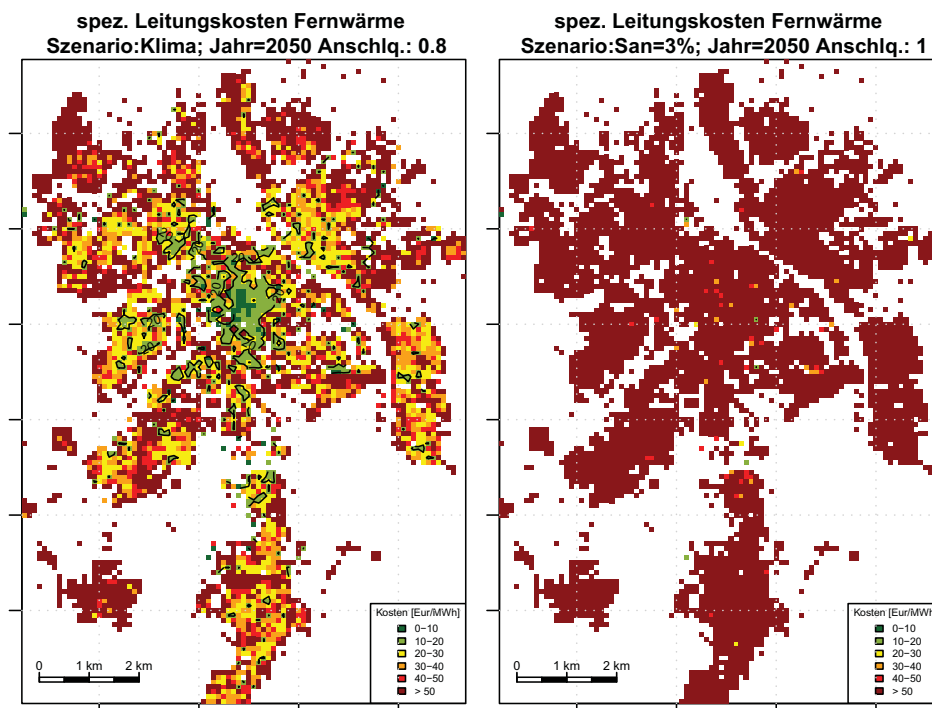


Abbildung 12.12.: Spezifische Leitungskosten für das Jahr 2050 bei Anschlussraten von 75% Szenario Klima (links) bzw. 100% Szenario San=3% (rechts).

12.2. zu Optimierung von Energiesystemen

12.2.1. Abschätzung Biomasse in Augsburg

Annahmen

- Region mit Radius 30 km um Augsburg
- Solare Einstrahlung 1000 kWh/(m²a)
- Wirkungsgrad Photosynthese bis nutzbare Biomasse 0,5%
- Anteil von Nutzflächen die zur Biomasseproduktion nutzbar ist 50%
- Anteil von energetisch nutzbarem Biomasseanteil 10%

=> ca. 700 000 MWh/a.

12.2.2. Abschätzung Solarpotential in Augsburg

Annahmen

- Aus Daten der Augsburger Gebäudedatenbank: ca. 8 000 000 m² Dachfläche
- Hälfte der Dächer First in Ost-West-Richtung (Faktor 0,5)
- Bei Satteldach Hälfte der Dachfläche in Südrichtung (Faktor 0,5)
- Hälfte des Daches nutzbar für Solarkollektoren (Faktor 0,5)
- Einstrahlung 800W/m²

=> maximale Einstrahlungsleistung auf Gebäuden für Augsburg ca. 800 MW.

12.2.3. Primärenergiefaktor

Daten aus Energiedaten letzte Änderung: 20.02.2008

in Deutschland wurden 2007 636,6 TWh/a an Strom erzeugt. Dazu werden 5,490 PJ/a an Primärenergie benötigt. Aus diesen Daten erhält man einen Primärenergiefaktor von 2,40 bzw. einen Erzeugungsgesamtwirkungsgrad von 41,7%. Berücksichtigt man Verluste und Eigenverbrauch der Energieindustrie von 76,5 TWh/a stehen 560,1 TWh/a für die Verbraucher zur Verfügung. Hieraus ergibt sich ein Primärenergiefaktor von 2,72 bzw. ein Wirkungsgrad von 36,7%. Quellen:

<http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken,did=180890.html>

<http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken,did=180894.html>

12.3. zu Boden-Wärmeflussmodell

12.3.1. zu Wärmeleitungsgleichung - periodische Rahmenbedingungen

Detailliertere Herleitung zu Gleichung (9.46)⁸. Es gelte:

$$\alpha = a + b i \quad (12.35)$$

Zur Berechnung von $\sqrt{\alpha}$ kann man zusätzlich

$$\alpha := (c + id)^2 = c^2 - d^2 + i2cd \quad (12.36)$$

definieren. Somit gilt:

$$a + ib = c^2 - d^2 + i2cd \quad (12.37)$$

und dementsprechend:

$$a = c^2 - d^2 \quad (12.38)$$

$$b = 2cd \quad (12.39)$$

Daraus folgt für rein imaginäres α ($\Rightarrow a = 0$):

$$c = \pm d \quad (12.40)$$

$$d = \pm \sqrt{b/2} \quad (12.41)$$

Für $b = 2\pi/P$ wird aus Gleichung (9.41)

$$T(x, t) = \exp \left\{ i \frac{2\pi t}{P} \right\} \left(A \exp \left\{ \sqrt{\frac{(\sqrt{\frac{\pi}{P}} + i\sqrt{\frac{\pi}{P}})^2}{\lambda_T}} x \right\} + B \exp \left\{ -\sqrt{\frac{(\sqrt{\frac{\pi}{P}} + i\sqrt{\frac{\pi}{P}})^2}{\lambda_T}} x \right\} \right). \quad (12.42)$$

bzw.

$$T(x, t) = \exp \left\{ i \frac{2\pi t}{P} \right\} \left(A \exp \left\{ \sqrt{\frac{(\sqrt{\frac{\pi}{P}}(1+i))^2}{\lambda_T}} x \right\} + B \exp \left\{ -\sqrt{\frac{(\sqrt{\frac{\pi}{P}}(1+i))^2}{\lambda_T}} x \right\} \right). \quad (12.43)$$

12.3.2. zu Wärmeleitungsgleichung - Eindringtiefe halibunendlicher Körper

Auswirkung der periodischen Anregung auf den Temperaturverlauf im halibunendlichen Körper für typische Bodenparameter.

Wellenlänge Λ bei einer Periodendauer von $P = 365$ d.

$$\Lambda = \sqrt{4\pi\lambda_T P} = \sqrt{4\pi 524 \cdot 10^{-9} \text{m}^2 \text{s} 365 \text{d}} = 14,4 \text{m} \quad (12.44)$$

⁸zu Gleichung (9.46) entsprechend

Amplitude in $\Lambda/2$ Tiefe:

$$T(\Lambda/2) = T_0 \exp \left\{ -\sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}} \frac{\sqrt{4\pi\lambda_T P}}{2} \right\} = T_0 \exp \{-\pi\} = 0,043 T_0 \quad (12.45)$$

Amplitude 1,2 m Tiefe:

$$T(1,2\text{m}) = T_0 \exp \left\{ -\sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}} 1,2\text{m} \right\} = T_0 \exp \{-\pi\} = 0,59 T_0 \quad (12.46)$$

Verzögerung in 1,2 m Tiefe: Wegen $\exp \left\{ i2\pi \left[\frac{t}{P} - \frac{x}{\Lambda} \right] \right\}$ muss

$$\frac{t}{P} - \frac{x}{\Lambda} = 0 \quad (12.47)$$

gelten. Daraus folgt

$$t(x) = x \sqrt{\frac{P}{4\pi\lambda_T}} \quad (12.48)$$

und somit

$$t(1,2\text{m}) = 1,2\text{m} \sqrt{\frac{P}{4\pi\lambda_T}} \approx 30\text{d} \quad (12.49)$$

12.3.3. zu Wärmeleitungsgleichung - Herleitung Admittanz

Es gilt:

$$T(x, t) = T_0 \exp \left\{ -\sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}} x \right\} \exp \left\{ i2\pi \left[\frac{t}{P} - \frac{x}{\Lambda} \right] \right\} \quad (12.50)$$

Für

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (12.51)$$

mit

$$u := \sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}} \quad (12.52)$$

folgt:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = T_0 \exp \{i2\pi t/P\} \exp \{-ux\} \exp \{-iux\} [-u - iu] \quad (12.53)$$

Für

$$\mathbf{a} = \frac{q(0, t)}{T(0, t)} \quad (12.54)$$

folgt somit:

$$\mathbf{a} = -\lambda(-u - iu) \quad (12.55)$$

$$= \lambda u(1 + i) \quad (12.56)$$

$$= \lambda \sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}} (1 + i) \quad (12.57)$$

$$= \sqrt{\frac{\lambda c \rho \pi}{P}} (1 + i) \quad (12.58)$$

bzw.

$$\mathbf{a} = \sqrt{\frac{2\pi c\rho}{P}} \exp\left\{i\frac{\pi}{4}\right\} \quad (12.59)$$

12.3.4. Szenarien Bodenmodell

Zusammenfassung der Szenarien des Bodenmodells.

| Szenario | Kollektortyp | Wärmerückführung | Szenario Name |
|--------------|--------------|------------------|---------------------------|
| <i>EFH i</i> | Boden | - | Koll100, Koll101, Koll102 |
| <i>EFH i</i> | Boden | Solar | Koll103 |
| <i>EFH i</i> | Boden | Kühlung | Koll104 |
| <i>EFH N</i> | Boden | - | Koll105 |
| <i>EFH N</i> | Boden | Kühlung | Koll106 |
| <i>EFH N</i> | Boden | Solar | Koll107 |
| <i>EFH P</i> | Boden | - | Koll108 |
| <i>EFH P</i> | Boden | Kühlung | Koll109 |
| <i>EFH P</i> | Boden | Solar | Koll110 |
| <i>EFH i</i> | Sonde | - | Sonde151 |
| <i>EFH i</i> | Sonde | Kühlung | Sonde152 |
| <i>EFH i</i> | Sonde | Solar | Sonde153 |
| <i>EFH N</i> | Sonde | - | Sonde154 |
| <i>EFH N</i> | Sonde | Kühlung | Sonde155 |
| <i>EFH N</i> | Sonde | Solar | Sonde156 |
| <i>EFH P</i> | Sonde | - | Sonde157 |
| <i>EFH P</i> | Sonde | Kühlung | Sonde158 |
| <i>EFH P</i> | Sonde | Solar | Sonde159 |
| <i>EFH N</i> | Keller | Solar | Keller203 |

Tabelle 12.1.: Modellszenarien

Zwischenschritte:

Mit $A = 0$ da sonst $\lim_{t \rightarrow \infty} T(x, t) = \infty$ und $B = 1$ aus Anfangsbedingung folgt

$$T(x, t) = T_0 \exp\left\{i\frac{2\pi t}{P}\right\} \exp\left\{-(1+i)\sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}}x\right\} \quad (12.60)$$

bzw.

$$T(x, t) = T_0 \exp\left\{-\sqrt{\frac{\pi}{P\lambda_T}}x\right\} \exp\left\{-i2\pi\sqrt{\frac{1}{4P\pi\lambda_T}}x\right\} \exp\left\{i2\pi\frac{t}{P}\right\} \quad (12.61)$$

12.3.5. Abschätzung maximaler Wärmeentzug mittels Sonde

Als Grundlage wird das Gebäude EFH_i zugrunde gelegt. 144 m², 99 kWh/(m²a), => ca. 14000 kWh/a Wärmebedarf. Entzug durch den Kollektor 12289 kWh/a. Sondenlänge 99m.

Außerhalb eines Zylinders mit Radius von 45 m ist die Temperaturveränderung nach 30 Jahren Betrieb unbeeinflusst ($< -0,1^{\circ}\text{C}$) (Abbildung 11.33). \Rightarrow Bodenoberfläche = 6361 m^2 . $\Rightarrow 2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$



Joachim Herrmann

Zu meiner Person

geboren am 17. Juli 1977 in Augsburg
Familienstand verheiratet, 3 Kinder

Studium

Promotion

01.09.2006 - Universität Augsburg & Max-Planck-Institut für Plasmaphysik Garching
09.01.2013

14.04.2012 Dissertation *Optimierung der städtischen Energieversorgung am Beispiel der Stadt Augsburg unter besonderer Berücksichtigung von Wärmetransportmechanismen*

Betreuer Prof. Dr. Thomas Hamacher

Diplomstudium Physik

WS2000/2001 Universität Augsburg
- 29.06.2006

Abschluss Diplom-Physiker Univ. Note: Gut (1,52)

Mai 2006 Diplomarbeit *Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Potential von Klein- Blockheizkraftwerken*

Betreuer Dr. Thomas Hamacher

Beruflicher Werdegang

01.04.2010 - Konzeptentwicklung erneuerbare Energien - GP JOULE Konzept GmbH & Co. KG Augsburg
heute

01.12.2009 - Wissenschaftliche Mitarbeit - Wissenschaftszentrum Umwelt, Universität Augsburg
28.02.2010

01.09.2006 - Doktorand - Max-Planck-Institut für Plasmaphysik Garching
30.11.2009

01.12.2009 - Wissenschaftliche Hilfskraft - Wissenschaftszentrum Umwelt, Universität Augsburg
28.02.2010

01.10.2004 - Wissenschaftliche Hilfskraft - Lehrstuhl Chemische Physik und Materialwissenschaften,
31.01.2005 Universität Augsburg

01.08.1999 - Zivildienst - Regionalstelle für kirchliche Jugendarbeit
31.06.2000

01.09.1994 - Ausbildung zum Papiermacher & Angestellter als Papiermachergeselle - Haindl Papier
31.07.1997 GmbH Augsburg

Schulbildung

- 9/1997 - Berufsoberschule Augsburg - *fachgebundene Hochschulreife*
6/1999
- 9/1990 - Realschule Neusäß - *mittlere Reife*
6/1994
- 9/1983 - Grund- & Hauptschule Diedorf
7/1990

Diedorf, 17.02.2013, Joachim Herrmann